

Impressum

Eine Information der kantonalen Forstämter Aargau, Bern, Basellandschaft, Basel-Stadt, Graubünden, Solothurn, Thurgau, Zug und Zürich und der Umweltfachstellen der Zentralschweiz mit Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

Auftraggeber

Kanton AG: Marcel Murri, Alain Morier | Kanton BE: Adrian Meier, Walter Beer, Roger Schmidt | Kantone BS/BL: Ueli Meier | Kanton GR: Dr. Ueli Bühler, Marco Vanoni, Reto Hefti | Kanton SO: Jürg Froelicher | Kanton TG: Gerold Schwager, Daniel Böhi | Kanton ZG: Dr. Martin Winkler | Kanton ZH: Erich Good, Dr. Konrad Nötzli | Umweltfachstellen der Zentralscheiz: Dr. Gérald Richner, David Widmer | BAFU Abteilung Wald: Dr. Sabine Augustin | BAFU Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien: Dr. Reto Meier

Auftragnehmer

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie

Autoren

Sabine Braun, Sven Hopf, Lucienne de Witte, unter Mitwirkung von: Delphine Antoni, Dieter Bader, Sabine Bulliard, Walter und Heidi Flückiger, Moïse Groelly, Caroline Stritt, Roland Woëffray

Disclaimer

Diese Studie wurde im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH, der Zentralschweizer Kantone und des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Herausgeber

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) Sandgrubenstrasse 25 CH-4124 Schönenbuch Telefon +41 61 485 50 70 www.iap.ch Französischer Titel
Notre forêt, comment se porte-t-elle?
Italienischer Titel
Com'è lo stato di salute dei nostri boschi?
Englischer Titel
How is our forest?
Design | Herstellung
krause-graphics.com | Lörrach

© IAP Schönenbuch | Januar 2018

Wie geht es unserem Wald?

34 Jahre Walddauerbeobachtung

Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH und der Zentralschweizer Kantone mit Beteiligung des BAFU | Bericht 2013-2017

Programme d'observation permanente intercantonal des forêts des cantons d'AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH , des offices de l'environnement de la Suisse centrale et de l'OFEV

Résultats de 2013 à 2017 | Rapport 5

Programma intercantonale di monitoraggio permanente dei boschi nei Cantoni di AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH e degli uffici per l'ambiente della Svizzera Centrale con la partecipazione dell'UFAM.

Risultati dal 2013 al 2017 | Rapporto 5

Intercantonal Permanent Forest Observation Program of the Cantons AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH, of the environmental offices of Central Switzerland and of the Federal Office for the Environment (FOEN)
Results from 2013 to 2017 | Report 5



Inhaltsverzeichnis | Contenu (p 6-15 francais)

Principaux résultats découlant des 34 ans d'observation				7 Stickst	offauswaschung und Bodenversauerung	58
permanente des forêts				7.1	Stickstoffauswaschung	60
Changement climatique				7.1.1	Vergleich mit Grenzwerten	60
Charge d´azote				7.1.2	Entwicklung	61
Ac	idificatio	on du sol	11	7.1.3	Mittlere N-Auswaschung in Beziehung	
Durabilité des éléments nutritifs dans la récolte des arbres entier					zu Standortsfaktoren	61
Ozone			14	7.2	Bodenversauerung	63
1	Einleit	ung	16	7.2.1	Entwicklung in den Beobachtungsflächen	
2	Bonitie	erung des Kronenzustands	17		mit Bodenlösungsmessungen	63
	2.1	Kronenverlichtung	17	7.2.2	Entwicklung in den Stickstoffversuchsflächen	66
	2.2	Baummortalität	19	7.3	Auswaschung von Phosphor + organischem Stickstoff	67
	2.2.1	Mortalität von Buchen	19	7.4	Abschliessende Bemerkungen	
	2.2.2	Mortalität von Fichten	20		zu Bodenlösungsmessung	68
	2.2.3	Mortalität von Eichen	22	7.5	Beziehung zwischen Vegetation und Basensättigung	69
	2.2.4	Sturmschäden und Waldbrand	23	7.5.1	Beziehung zwischen Basensättigung + Zeigerarten	69
	2.2.5	Wirkung von Trockenheit und Ernährung		7.5.2	Beziehung zwischen Basensättigung +	
		auf die Mortalität	24		Vegetationseinheit	70
	2.3	Monitoring Eschentriebsterben	25	7.6	Regenwürmer und ihre Beziehung zur Bodenchemie	
	2.4	Phytopathologische Untersuchungen an Ahorn	27		und den Feuchteverhältnissen	71
3	Nährst	offversorgung	28	8 Mykor	rhizierung von Buchen	
	3.1	Entwicklung	28	in eine	em Stickstoffgradienten	74
	3.2	Nährstoffkonzentrationen und Stickstoffdeposition	30	8.1	Einleitung	74
	3.3	Nährstoffkonzentrationen und Bodenlösung	32	8.2	Vorgehen	74
	3.4	Nährstoffkonzentrationen und Ozonbelastung	32	8.3	Ergebnisse	76
	3.5	Ernährungsversuche Alvaneu, Davos, Klosters	33	8.4	Diskussion	79
4 Triebwachstum und Fruchtbehang		34	9 Nährst	offbilanzen	81	
	4.1	Triebwachstum	34	9.1	Nährstoffkonzentrationen in Rinde und Holz	81
	4.2	Fruchtbehang bei Buchen	35	9.2	Nährstoffentzug bei Ernte	
	4.3	Verfärbungen	37		verschiedener Baumfraktionen	83
	4.3.1	Interkostalchlorosen	37	9.3	Phosphor-Eintrag und Phosphor-Austrag	83
	4.3.2	Photobleaching	38	9.4	Berechnung der Durchwurzelungstiefe	84
5 Stammzuwachs		40	9.5	Berechnung von Nährstoffbilanzen	86	
	5.1	Entwicklung und Artenvergleich	40	9.6	Verallgemeinerung der Nährstoffbilanzrechnungen	88
	5.2	Welche Faktoren erklären den Stammzuwachs?	41	9.6.1	Modellierung Oberhöhenbonität	88
	5.2.1	Stammzuwachs der Buchen von 1984-2014	42	9.6.2	Modellierung der Nährstoffbilanzen	90
	5.2.2	Stammzuwachs der Fichten von 1992 bis 2014	46	9.7	Empfehlungen für gefährdete Standorte	92
	5.2.3	Diskussion des Stammzuwachses 1984-2014	49	9.7.1	Förderung des Jungwuchses	93
	5.3	Dendrochronologische Untersuchungen	50	9.7.2	Ernteverfahren	93
6	6 Auswirkung erhöhter Stickstoffeinträge		52	9.7.3	Baumartenwahl und biologische	
	6.1	Stickstoffeinträge in der Schweiz	52		Aktivität des Bodens	93
	6.2	$Stick stoffe in träge\ in\ Walddauer beobachtungsflächen$	54	9.7.4	Humusbewirtschaftung	95
	6.2.1	Freilandniederschlag und Kronentraufe	54	9.8	Nährstoffrecycling mit der Laubstreu	95
	6.2.2	Eintrag von Ammoniakstickstoff	55	10 Trocl	kenheit	96
	6.2.3	Vergleich Kronentraufe – Einzelkomponenten	55	10.1	Wasserfluss im Stamm	98
	6.3	Auswirkungen auf den Wald	56	10.2	Tiefe der Wasseraufnahme	99
	631	Nadeliahrgänge hei Eichten	57			

10.3	10.3 Trockenheitsindikatoren					
10.3.	Verwendete Trockenheitsindikatoren	101				
10.3.2	2 Vergleich der Indikatoren	104				
10.3.3 Gleichungen für die Bewertung des						
	Trockenstresses in Klimaszenarien	106				
10.3.4	4 Projektion in die Zukunft	107				
10.4	Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope in Jahrringen	108				
10.4.	Probenumfang und Berechnungen	108				
10.4.2	2 Ergebnisse der Isotopenanalysen	110				
10.5	Sauerstoffisotope in Xylemwasser	112				
11 Ozon 1						
11.1	Entwicklung und Wirkung auf Pflanzen	113				
11.2	Ozonschäden an den Gipfeltrieben	114				
11.3	Länge der Vegetationsperiode zur Evaluation					
	der Ozonbelastung	115				
12 Bodenverdichtung						
12.1	Regenwürmer	116				
12.2	Regeneration der Wasserleitfähigkeit	117				
13 Liter	13 Literatur					
14 Anha	ng	128				
14.1	Statistische Auswertung und Tabellen	128				
14.1.2	Polynomially distributed lag model zur					
	Berechnung der Tiefe der Nährstoffaufnahme	136				
14.1.3	Polynomially distributed lag model für die					
	Beziehung mit Klimaparametern im Jahresverlauf	136				
14.2	Glossar	138				

Principaux résultats découlant des 34 ans d'observation permanente des forêts

Eléments clés :

- L'approvisionnement en phosphore a baissé de 25% pour le hêtre et de 15% pour l'épicéa. Cette substance fait actuellement souvent défaut.
- Depuis 1987, la croissance du tronc a diminué de 31% chez le hêtre, alors que l'on n'observe aucune tendance claire chez l'épicéa.
- Les dépôts d'azote supérieurs à 25 kilos par hectare et par an entravent la croissance du hêtre et de l'épicéa.
- Les dépôts d'azote élevés accentuent l'effet de la sécheresse sur la croissance du tronc chez le hêtre et sur la mortalité chez l'épicéa.
- Les interactions entre l'azote et la sécheresse, ainsi que les hivers chauds jouent un rôle important dans l'explication de la perte de croissance chez le hêtre.
- Les dépôts d'azote élevés réduisent la mycorhization des racines de hêtre et la diversité des espèces. La saturation en bases est le facteur qui influence le plus la composition des espèces de champignons mycorhiziens.
- Chez le hêtre, la fructification a fortement augmenté depuis l'an 2000.
- L'acidification du sol a progressé au cours de la période d'observation.
- Le risque de chablis est nettement accru sur les sols pauvres en bases.
- Bien que la chalarose du frêne se soit répandue dans toute la Suisse depuis 2008, on rencontre encore des individus préservés de cette maladie.
- Contrairement au hêtre et à l'épicéa, le chêne ne réagit pas à la sécheresse en ce qui concerne la défoliation des houppiers.
- La récolte d'arbres entiers n'est pas durable au niveau des bilans des éléments nutritifs, avant tout en raison des dépôts d'azote actuels.



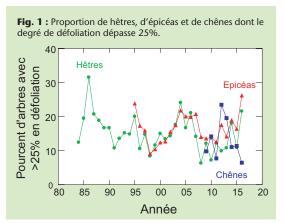
Photo 1 : Dégâts de sécheresse dans la région de La Sarraz (VD), prise de vue du 29.07.2015.

L'observation permanente des forêts est un instrument précieux pour reconnaître et documenter les lents changements qui interviennent dans les forêts. Dans les années quatre-vingt, au début du programme d'observation permanente des forêts, on mettait l'accent sur les conséquences des pluies acides et sur

les effets de l'ozone. Ensuite, c'est l'incidence des importants dépôts d'azote sur les forêts qui a retenu toute l'attention des chercheurs. Les dernières évolutions dans la forêt suisse indiquent que le changement climatique est devenu un facteur essentiel pour la santé des milieux boisés. Les changements observés sont par conséquent le résultat de multiples facteurs d'origine humaine.

Celles-ci concernent notamment la charge accrue d'azote, l'acidification du sol et la charge élevée d'ozone durant les mois estivaux. Les paragraphes suivants présentent les résultats et le bilan des 34 années d'observation permanente des forêts, avec référence à la partie détaillée du rapport (seulement en allemande).

Les observations faites dans les forêts suisses au cours des quatre dernières années ont attiré l'attention sur le changement progressif du climat. Celui-ci comprend la sécheresse de longue durée de l'été 2015 qui a provoqué le brunissement des houppiers dans plusieurs régions du pays, comme ce fut le cas dans des chênaies pubescentes en Valais et à La Sarraz VD (photo 1). La sécheresse joue, conjointement avec le gel tardif, les hivers chauds, la fructification forte et la charge en ozone,



un rôle important dans la défoliation des houppiers de hêtre et d'épicéa, alors qu'aucun effet de la sécheresse n'est visible chez le chêne (chap. 10). Cette tendance est aussi clairement perceptible au cours de la défoliation qui est assez syn-



Photo 2 : Hêtre caractérisé par une fructification extrêmement élevée.

chrone chez le hêtre et l'épicéa, mais qui, chez le chêne, évolue plutôt à contresens des deux autres essences (fig. 1, chap. 2.1.). Le fort jaunissement, constaté lors de la dernière récolte des pousses sommitales en août 2015, est probablement aussi lié à la chaleur et à la sécheresse.

Chez le hêtre, la fréquence des **années** à **graines** s'est accrue depuis quelques années. Il en va de même de la quantité de semences produites (chap. 4.2.). La littérature forestière parle d'une année à graines (ou fructification complète) lorsque l'on recense plus de 150 fruits par m². En 2011, on a observé, avec quelque 430 fruits par m², la plus forte fructification jamais enregistrée. En 2014, il y avait env. 360 fruits par m². 2016 s'est révélée être une nouvelle

année à forte production de semences: les hêtres observés apparaissaient souvent plutôt bruns que verts et les feuilles étaient particulièrement petites (photo 2). La prochaine récolte de pousses sommitales, en 2019, permettra de déterminer s'il s'agit bien d'un nouveau record. Cette évolution influence négativement la croissance des arbres, vu qu'une fructification accrue accapare de nombreuses ressources importantes pour le développement de l'arbre.

Le dépérissement d'un épicéa est souvent dû à une invasion de **bostryches**. Ce coléoptère attaque de préférence les arbres



Photo 3: Attaque de bostryches dans la placette de Scheidwald (BE).

affaiblis, comme c'est le cas au cours de longues périodes de sécheresse. Durant les étés caniculaires 2015 et 2016, il a bénéficié d'excellentes conditions pour atteindre, en 2017, le deuxième plus haut niveau d'infestation enregistré depuis le début des observations. L'analyse des données montre cependant aussi que l'effet de la sécheresse est massivement renforcé par la forte charge d'azote ou la



Photo 4 : Frêne endommagé.

carence en éléments nutritifs (potassium, magnésium) (chap. 2.2.2.). Le nombre de générations d'aiguilles diminue, chez l'épicéa, sur les surfaces soumises à d'importants dépôts d'azote. Cela signifie que le stress climatique, combiné à la dégradation de l'environnement, affaiblit encore davantage l'épicéa. La sécheresse ou le manque de phosphore accroît le taux de mortalité du hêtre.

La chalarose du frêne est une maladie importée d'Asie dont la présence fut constatée pour la première fois dans les années nonante en Pologne, d'où elle se répandit rapidement dans toute l'Europe (1). En 2008, on a enregistré pour la première fois les symptômes du flétrissement dans le nord-ouest de la Suisse (2, photo 4), d'où la maladie s'est disséminée dans tout le pays en l'espace de sept ans. En 2013, l'IAP/IBA a lancé un projet de monitorage afin d'en apprendre davantage sur l'évolution de la maladie et trouver des arbres résistants. Des 204 frênes sains choisis, seuls 22% ne présentaient optiquement aucun symptôme en 2017 (chap. 2.3).

Mis à part les années extrêmes 1990 et 1999, les **dégâts de tempête** ont en moyenne augmenté depuis les années nonante (chap. 2.2.4). Des analyses d'anciennes données ont en outre montré que davantage d'arbres sont déracinés sur les sols fortement acidifiés. Les dépôts d'azote élevés et la forte acidification du sol affaiblissent le système racinaire et c'est pourquoi les arbres sont plus vite victimes d'une tempête, comme en 2017 à Giswil OW (photo 5).

Photo 5 : Dégâts de tempête à Giswil (OW).



Chez le hêtre, la **croissance du tronc** a nettement chuté depuis 1987 (fig. 2, chap. 5.1.). Chez l'épicéa, une baisse a été observée jusqu'en 2006, puis la croissance a repris. L'accroissement du chêne est légèrement inférieur à celui du hêtre si l'on fait la moyenne de toutes les placettes où ces deux essences poussent ensemble.

Alors que l'augmentation des dégâts de tempête, de la fructification du hêtre ou du jaunissement des houppiers à la suite de périodes extrêmes de séche-

Fig. 2: Evolution de l'accroissement de la surface terrière par arbre pour le hêtre et l'épicéa.

40
Hêtres
Epicéas

1990 1995 2000 2005 2010 2015

resse et de canicule concerne des phénomènes bien visibles, les modifications de l'état de santé des arbres (chap. 2.1), de l'approvisionnement en éléments nutritifs (chap. 3), de l'accroissement du tronc (chap. 5.1) et de l'acidification du sol (chap. 7.2) ne peuvent être définies qu'au moyen de mesures standardisées et répétées. L'observation permanente d'un large panel de placettes forestières durant de nombreuses années (fig. 3) est de ce fait un excellent instrument pour mettre en évidence les principales évolu-

Fig. 3: Placettes d'observation de l'IAP/IBA.

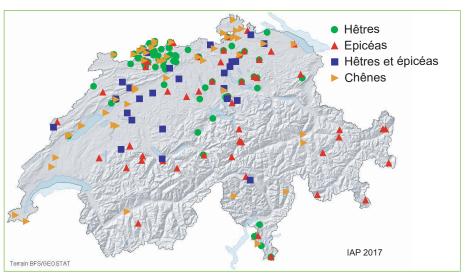
tions de la forêt au plan forestier et pour déterminer les modifications spatio-temporelles de l'écosystème forestier.

Changement climatique

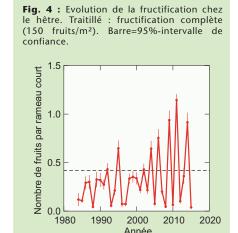
L'influence de l'être humain sur le climat a été bien documentée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat («Intergovernmental Panel on Climate Change », 3). En Suisse, les températures ont déjà augmenté de 1,8°C depuis 1864 (4). On n'observe certes pas de tendance particulière au niveau des quantités de précipitations, mais les températures élevées amplifient l'évaporation et par conséquent le stress hydrique. Les années caractérisées par de longues périodes de sécheresse et de canicule extrême ont été nettement plus fréquentes au cours des deux dernières décennies.

Nos placettes d'observation permanente des forêts couvrent un large gradient de température et de sécheresse et s'avèrent ainsi optimales pour l'analyse des effets climatiques sur les forêts naturelles.

Selon nos évaluations, les tempéra-



tures élevées ont peu d'influence sur les arbres forestiers, outre le fait que les hivers chauds (températures moyennes élevées de décembre à mars) entravent l'accroissement du tronc chez l'épicéa et que d'importants dépôts d'azote renforcent cet effet. Chez le hêtre, les hivers



1990

2010

2000

2020

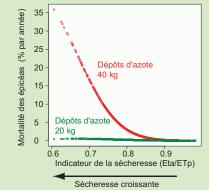
chauds ne perturbent la croissance que si la charge d'azote est élevée ou que les arbres sont mal approvisionnés en magnésium (chap. 5.2). L'augmentation de la température (5) et de la force d'évaporation de l'air (déficit en matière de pression de vapeur saturante) joue également un rôle déterminant dans la fructification du hêtre (chap. 4.2). Comme indiqué plus haut, la fructification a fortement progressé au cours de la période d'observation. Une forte fructification étant corrélée très négativement avec l'accroissement du tronc et positivement avec la défoliation des houppiers, le hêtre ne peut pas profiter des températures élevées et sa vitalité s'en trouve même affectée.

L'effet de la sécheresse sur la croissance du tronc est important pour la pratique forestière. Les processus sous-jacents sont moins bien connus (6). L'exploitation des données issues de l'observation permanente des forêts montre que le bilan hydrique de la station est le mieux à même pour expliquer l'effet de la sécheresse sur la croissance du tronc. Il s'agit de la différence, cumulée au cours d'une période de végétation, entre la somme des précipitations et la capacité de rétention hydrique du sol, ainsi que l'évaporation potentielle (=évapotranspiration). Chez le hêtre, la sensibilité à la sécheresse en termes de croissance augmente nettement en présence de dépôts d'azote élevés ou d'un déséquilibre dans l'approvisionnement en potassium. Les interactions de l'apport d'azote avec la sécheresse et la température hivernale jouent probablement un rôle important dans l'explication du ralentissement de la croissance observé chez le hêtre.

Le stress hydrique aigu entraîne une chute de pression dans les vaisseaux du bois. Lors de ce phénomène, la forte tension de l'eau provoque des bulles d'air dans les vaisseaux, compromettant ainsi la circulation de l'eau

dans les plantes (embolie ou cavitation). Pour que les différentes essences d'arbres soient tolérantes à la sécheresse, il importe que si la cavitation ait déjà lieu lors des tensions récurrentes de l'eau ou 'qu'il y ait une « distance de sécurité » par rapport aux valeurs extrêmes (7, 8). Un arbre meurt lorsqu'une certaine proportion des vaisseaux ont perdu leur fonction (9). Par la fermeture des stomates, les arbres forestiers peuvent contrer le stress hydrique jusqu'à un certain point. Nos analyses des isotopes de carbone et d'oxygène dans des sections de tronc montrent clairement que ce processus est plus efficace chez le hêtre que chez l'épicéa (chap. 10.4). Une autre possibilité d'éviter le stress hydrique consiste à prélever de l'eau dans les couches profondes du sol. L'analyse des isotopes d'oxygène et d'hydrogène dans l'eau de pluie, le sol, les rameaux et le feuillage permet également d'étudier ce processus (chap. 10.5). Les résultats obtenus en collaboration avec l'Institut Paul-Scherrer (PSI) montrent que l'épicéa prélève l'eau du sol moins profondément que le hêtre et le chêne. A Möhlin AG, les mesures du flux de l'eau chez le chêne ont clairement mis en évidence l'importance des couches profondes du sol. La tension de l'eau dans le tronc a nettement augmenté durant la période de sécheresse estivale 2015. Pourtant, le flux de l'eau, fortement réduit, était encore perceptible, alors que le sondage de l'eau du sol jusqu'à 60 cm de profondeur ne signalait pas la présence d'eau accessible aux plantes. Si les couches profondes du sol font défaut, le chêne pubescent subit également des

Fig. 5 : Interaction entre la sécheresse et les dépôts d'azote sur la mortalité de l'épicéa. Prévisions sur la base d'un modèle de régression à variables multiples, mettant en moyenne les autres paramètres.



dégâts de sécheresse, comme le montre l'exemple de La Sarraz VD (photo 1).

Pour les arbres forestiers adultes croissant sous nos latitudes, la défaillance hydraulique directe des vaisseaux ne joue probablement pas un rôle aussi important, en termes de mortalité, que les attaques de parasites secondaires comme le bostryche, l'armillaire ou la nécrose de l'écorce du hêtre. Avant de mourir, le hêtre et le chêne présentent pendant plusieurs années des signes de vitalité réduite, indiquant l'attaque de parasites. La sécheresse influence durant un certain nombre d'années la mortalité des arbres, de toutes les espèces (chap. 2.2). Le rapport entre l'évapotranspiration actuelle et potentielle constitue le meilleur indicateur de sécheresse pour la mortalité de nos essences forestières (chap.10.3). Ce rapport peut être calculé à l'aide de modèles hydrologiques et indique dans quelle mesure la transpiration est limitée en cas de sécheresse. Les dépôts d'azote et les déséquilibres au niveau des éléments nutritifs (fig. 5) renforcent en outre l'effet de la sécheresse sur le taux de mortalité de l'épicéa (chap. 2.2).

Le hêtre débourre plus tôt dans la saison en raison du changement climatique (chap. 11.2). Le jaunissement des feuilles a aussi lieu un peu plus vite, probablement à cause de la sécheresse. En tout, la période de végétation s'est allongée d'une dizaine de jours entre 1980 et 2015.

Charge d'azote

L'industrie, le trafic et l'agriculture émettent une grande quantité de composés azotés réactifs, qui parviennent dans les écosystèmes via l'air, par la

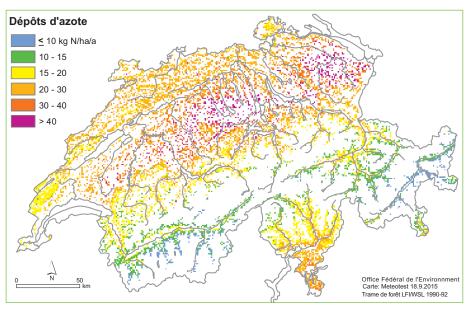


Fig. 6 : Carte des dépôts d'azote modélisés en forêt pour 2010 (OFEV/Meteotest).

pluie (dépôts humides) et sous forme d'aérosol ou de gaz (dépôts secs). En raison de leur forte rugosité de surface, les forêts sont particulièrement efficaces dans la fixation de ces composés. En Suisse, les dépôts peuvent dépasser les 50 kilos d'azote par hectare et par an (kg N ha-1 a-1). Les écosystèmes forestiers sont sensibles aux apports d'azote. Dans les années quatre-vingt, on avait déjà connaissance des problèmes que posent les fortes charges d'azote dans les écosystèmes forestiers (10, 11). La Convention de la CEE/ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (Convention LRTAP) a permis de définir des valeurs limites pour les dépôts d'azote (charges critiques) dans différents écosystèmes (12). Ces valeurs s'élèvent à 10-20 kg N ha⁻¹ a⁻¹ pour les forêts de feuillus des zones tempérées et à 5-15 kg N ha-1 a-1 pour les forêts de résineux. Ces charges critiques sont dépassées sur plus de 95% de l'aire forestière suisse (13).

Les mesures prises pour améliorer la qualité de l'air ont permis de réduire légèrement l'apport d'azote au cours des dernières années. Cette tendance ne peut pourtant pas être observée partout dans les pluviolessivats (précipitations atteignant le sol sous les houppiers). Ainsi, les dépôts d'azote sont stables dans les pluviolessivats de l'épicéa à Muri AG, alors qu'ils n'ont cessé d'augmenter à Brislach BL. A Sagno TI, les dépôts d'azote ont chuté entre 2003 et 2006, pour de nouveau augmenter légèrement entre 2006 et 2015. La charge

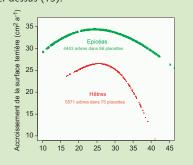
Photo 6 : L'épandage du lisier à l'aide d'une bossette à pression accroît la charge d'azote.



d'azote reste encore nettement trop élevée, malgré la baisse observée.

L'azote est une substance essentielle pour les plantes qui permet souvent d'améliorer la croissance. Depuis les années quatre-vingt, on constate une croissance accrue des arbres forestiers

Fig. 7: Relation entre l'accroissement du tronc (hêtre et épicéa) et les dépôts d'azote. Toutes les variables, sauf les dépôts d'azote, ont été mises en moyenne dans le graphique ci-dessus (15).



(14), attribuée à l'azote. L'augmentation de la croissance dépend cependant aussi de la disponibilité des autres nutriments nécessaires aux arbres, comme le phosphore, le potassium et le magnésium. Cette stimulation de la croissance est par conséquent limitée et dépend des réserves d'éléments nutritifs du sol forestier et de la capacité d'absorption de ceux-ci. Les données de l'observation

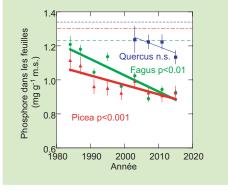
Photo 7: Mesure de l'accroissement du tronc.

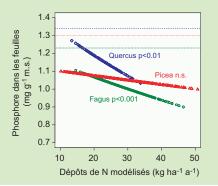


permanente des forêts le montrent clairement : les valeurs inférieures à 25 kg N ha⁻¹ a⁻¹ indiquent une légère hausse de la croissance (fig. 7, chap. 5.1). Soumis à des charges plus élevées, l'épicéa accuse une faible baisse et le hêtre une chute massive de croissance (chap. 5.2). Les changements de concentration en nutriments des arbres et les interactions entre les dépôts d'azote et les facteurs climatiques (sécheresse, températures hivernales) jouent un rôle déterminant dans la diminution de la croissance. Les dépôts d'azote élevés et par conséquent les déséquilibres au niveau des éléments nutritifs qui en découlent accroissent l'effet inhibiteur de la sécheresse. En

observée pour toutes les essences (chez le hêtre, aussi celle en potassium et en magnésium) (chap. 3), est probablement une conséquence de l'approvisionnement excessif en azote. Les changements ont engendré une carence aiguë en phosphore chez le hêtre et l'épicéa et en magnésium chez le hêtre. Les rapports des concentrations foliaires entre l'azote et le phosphore dépassent nettement les valeurs limites d'un état nutritionnel harmonieux et croissent avec l'augmentation de l'apport d'azote. L'augmentation de la charge d'azote empêche en outre le hêtre d'accéder correctement aux réserves de potassium et de phosphore du sol, indiquant que l'absorption d'éléments nutri-

Fig. 8 : Evolution des concentrations foliaires en phosphore chez le hêtre, l'épicéa et le chêne (à gauche) et relation entre les concentrations en phosphore et l'apport d'azote modélisé (à droite). Traitillé : valeur limite en matière de nutrition suffisante, selon Göttlein (16).



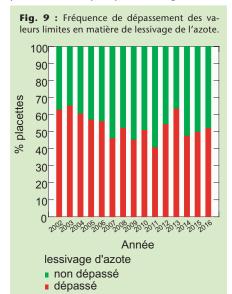


outre, ils entravent l'accroissement du tronc chez le hêtre lors d'un hiver chaud (chap. 5.2). Selon toute vraisemblance, ces interactions sont largement responsables de la diminution de croissance, observée chez le hêtre au cours des 34 dernières années.

Le déséquilibre des éléments nutritifs dans les feuilles et les aiguilles des arbres constitue un autre effet de l'augmentation de la charge d'azote. La diminution de la concentration foliaire en phosphore, tifs est perturbé. L'état nutritionnel du chêne est globalement un peu meilleur.

Le déséquilibre des éléments nutritifs présents dans les arbres est probablement aussi responsable de la diminution de résistance face aux parasites et à la sécheresse. Chez l'épicéa, cette interaction s'exprime par une hausse de la mortalité en cas de sécheresse, lorsque les dépôts d'azote sont élevés et que la concentration en potassium ou en magnésium est simultanément déséquilibrée (chap. 2.2.2). Chez le hêtre, la mortalité augmente également si la concentration foliaire en phosphore est faible (chap. 2.2.1).

L'azote qui n'est pas absorbé par les plantes et les microorganismes est lessivé du sol sous forme de nitrates. Ce processus indique que la charge d'azote



est excessive. L'ONU/CEE a défini des valeurs limites à cet effet (17). En Suisse, elles ont été différenciées en fonction de l'altitude. Ces valeurs limites sont aujourd'hui dépassées dans près de la moitié des placettes de mesure de la solution de sol (fig. 9), malgré la légère baisse du lessivage des nitrates constatée depuis 2005.

Dans l'écosystème forestier, la charge d'azote entraîne aussi des modifications dans la strate herbacée et la composition des microorganismes du sol. Les espèces végétales non tolérantes à l'azote, souvent menacées, régressent, alors que les espèces nitrophiles, comme l'ortie ou le sureau, progressent. La ronce fait également partie de cette dernière catégorie de plantes. Son degré de recouvrement augmente de manière exponentielle quand les dépôts d'azote dépassent 20-25 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (fig. 10). La diversité des champignons mycorhi-



Photo 8: Tapis de ronce (Frienisberg BE).

Fig. 10 : Degré de recouvrement, par la ronce, des zones lumineuses des placettes d'observation, en relation avec les dépôts d'azote modélisés.

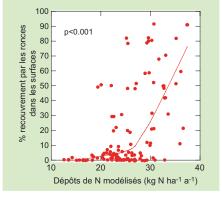
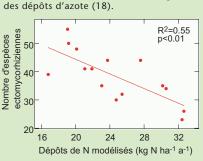


Photo 9 : Plusieurs espèces de champignons mycorhiziens, p. ex. *Cenococcum geophilum* et *Laccaria amethystina*, sur une racine de hêtre provenant de Zugerberg Vordergeissboden (ZG).



Fig. 11 : Nombre d'espèces mycorhiziennes sur les racines de hêtre, selon un gradient des dépôts d'azote (18).



ziens liés aux racines de hêtre diminue lorsque la charge d'azote augmente (18, chap. 10.4). Le taux de mycorhization des radicelles, c.-à-d. la proportion des extrémités radiculaires colonisées par des champignons, régresse également (fig. 11). Il est intéressant de remarquer que les espèces jouant un rôle important dans l'absorption du phosphore se raréfient aussi avec l'augmentation des dépôts d'azote.

Acidification du sol

Les mesures prises pour améliorer la qualité de l'air ont permis de réduire drastiquement l'apport de composés soufrés, c.-à-d. les « pluies acides » classiques. Les dépôts d'azote demeurent cependant élevés et exercent également un effet acidifiant. L'ammonium du sol est transformé en nitrate avec libération de ions acides. Les nitrates qui ne sont pas absorbés par les plantes et les microorganismes sont lessivés du sol, entraînant avec eux des ions chargés positivement. En font partie les cations basiques (calcium, potassium, magnésium et sodium), ainsi que le manganèse et l'aluminium quand le pH est bas (fig. 12). Ce processus conduit à l'acidification du sol et par conséquent à une diminution de la saturation en bases, c.-à-d. la part de cations basiques dans la capacité d'échange cationique du sol. L'acidification peut être judicieusement surveillée au moyen d'échantillons de solution de sol prélevés à la bougie fixe. En cas d'acidification, le rapport entre les cations basiques et l'aluminium, appelé rapport BC/AI, diminue dans la solution de sol. Les mesures indiquent une nette progression de l'acidification (fig. 13), même si, sur quelques stations, on observe un ralentissement de l'acidification du sol, probablement dû à une baisse de l'apport d'azote.

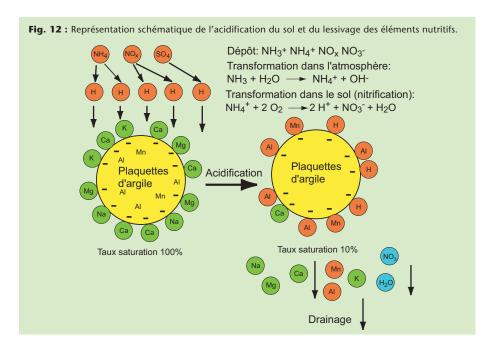
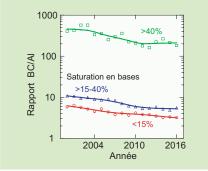


Fig. 13: Evolution de l'indicateur d'acidification (rapport BC/Al) dans la solution de sol de placettes forestières présentant différents degrés d'acidification. Données provenant de la strate supérieure du sol (0-30 cm). Saturation en bases <15%: sol très fortement acidifié, >15-40%: sol fortement acidifié, >40%: sol riche en bases.



Les conséquences possibles d'une acidification progressive du sol forestier passent souvent inaperçues. Il s'agit par exemple de changements dans la composition de la végétation ou des champignons ectomycorhiziens, de la fragilisation de l'enracinement, ou du déséquilibre au niveau des éléments nutritifs, comme le manque de magnésium chez le hêtre. De plus, le risque de chablis s'accroît fortement sur les sols acidifiés (19).

Les cartes de végétation ou de géologie permettent de calculer l'état actuel de la saturation en bases du sol (chap. 7.5),



Photo 10 : Transformation de houppiers de hêtre en copeaux (Möhlin AG).

rendant possible l'évaluation des risques pour les zones forestières. Les cantons de AG, BL, BS, FR, SO, TG et ZH ont établi des cartes de saturation en bases à l'échelle 1:5'000.

Durabilité des éléments nutritifs dans la récolte des arbres entiers

La récolte d'arbres entiers à des fins énergétiques accroît la production de biomasse de près d'un tiers. Outre le fait que le pouvoir calorifique des houppiers est plus faible, cette pratique prélève beaucoup plus d'éléments nutritifs que la récolte de grumes. Cela concerne tout particulièrement le phosphore. Le sol forestier est alimenté en nutriments par

Fig. 14: Cycle des éléments nutritifs en forêt, avec apport et export.

Apports
N. Ca, Mg, K (P) S

Perte de N. P. Ca, K. Mg, S
Récolte par assortiments

Perte de N. P. Ca, K. Mg, S
Récolte par arbres entiers

Alteration
Ca, K. Mg, (P), Na, Al, S

Drainage
NO₃, Ca, K, Mg, (P), Al, S

l'altération des minéraux et l'apport par dépôt (poussière des champs ou d'origine volcanique, poussière du Sahara, etc.). Ces sources ne parviennent pratiquement jamais à compenser le surplus de phosphore prélevé lors de la récolte d'arbres entiers. S'agissant du potassium et du calcium, les pertes sont couvertes dans la moitié des cas. Compte tenu du lessivage actuel des éléments nutritifs imputable aux dépôts azotés, les bilans du calcium et du magnésium s'avèrent également négatifs dans la majeure partie des cas. Cela signifie avant tout que l'apport actuel d'azote empêche en

Photo 11 : Coloration bronzée sur le hêtre due à l'influence de l'ozone (Muttenz BL).



général une gestion durable des forêts et que la récolte d'arbres entiers n'est jamais pérenne, sans un recyclage des nutriments (chap. 9).

Ozone

L'ozone est un puissant agent oxydant. Son effet sur les plantes est très bien étudié (20). Il provoque des dégâts caractéristiques, visibles sur le feuillage (21, voir chap. 11.2). Ce sont cependant les

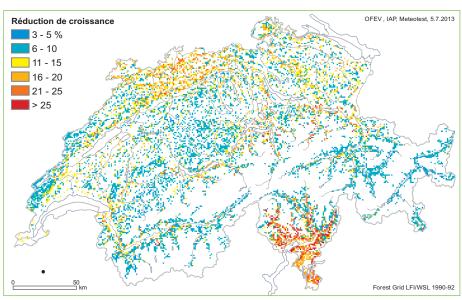
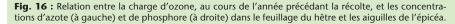
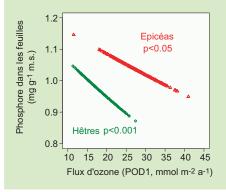
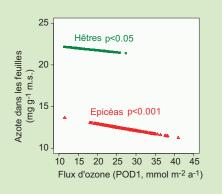


Fig. 15 : Estimation de la réduction de croissance due à l'ozone pour les arbres forestiers (21).







réductions de croissance induites par l'ozone qui ont un impact sérieux au niveau forestier. En interprétant les données de différents essais de gazage, un groupe de travail de la Convention LR-TAP a défini des valeurs limites relatives à la croissance pour divers groupes d'essences (22). Actuellement, ces valeurs s'élèvent à 5.2 pour le hêtre et à 9.2 mmol m-2 a-1 pour l'épicéa et sont dépassées chaque année sur toutes les stations de mesure de l'IAP/IBA. Un effet de

l'ozone sur la croissance ressort également des évaluations de l'accroissement du tronc d'arbres forestiers adultes. La cartographie du flux d'ozone à l'échelon national a permis d'estimer une réduction de croissance de 11% pour la forêt suisse (23).

Depuis les années quatre-vingt, les pics de concentration d'ozone ont un peu diminué grâce à la réduction des émissions de précurseurs d'ozone, c.-à-d. les oxydes d'azote et les hydrocarbures provenant du trafic et de l'industrie. La charge moyenne (valeur médiane) est cependant restée stable ou a légèrement progressé et le niveau de base a augmenté (24). Pour les arbres, ce n'est cependant pas la concentration d'ozone dans l'air qui importe, mais l'absorption d'ozone par les stomates (flux d'ozone). Depuis l'an 2000, le flux d'ozone a baissé sur quatre des six stations de mesure exploitées par l'IAP/IBA pour l'épicéa et sur une des cinq stations pour le hêtre.

Chez le hêtre, la défoliation des houppiers augmente lorsque la charge d'ozone est élevée (chap. 2.1). L'ozone a aussi une incidence sur la nutrition de l'arbre, car il réduit les concentrations d'azote et de phosphore dans les feuilles de hêtre et dans les aiguilles d'épicéa (chap. 3.4). L'ozone entrave en général le transport des hydrates de carbone via le phloème dans les racines et influence ainsi négativement la croissance des racines et les champignons mycorhiziens (voir aussi chap. 10.4).

Traduction: Claude Gassmann

Littérature

- Kowalski, T. und Holdenrieder, O. (2008). Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 3, 45-50.
- Engesser, R. et al. (2009). Wald und Holz 90, 24-27.
- 3. IPCC (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of the Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Remund, J. et al. (2016). In: Wald im Klimawandel, eds. Pluess, A. R., Augustin, S. and Brang, P., pp. 23-37. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- 5. Drobyshev, I. et al. (2010). Forest Ecology and Management 259, 2160-2171.
- Arend, M. et al. (2016). In: Wald im Klimawandel, eds. Pluess, A. R., Augustin, S. and Brang, P., pp. 77-91. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- 7. Choat, B. et al. (2012). Nature 491, 752-755.
- 8. Engelbrecht, B. M. J. (2012). Nature 491, 675-677.
- Brodribb, T. J. und Cochard, H. (2009).
 Plant Physiology 149, 575-584.
- 10. Nihlgård, B. (1985). Ambio 14, 1-8.
- 11. Aber, J. D. et al. (1989). BioScience 39, 378-386.
- Bobbink, R. und Hettelingh, J.-P. (2011).
 RIVM report 680359002, Coordination
 Centre for Effects, National Institute for
 Public Health and the Environment (RIVM).
- 13. Rihm, B. und Achermann, B. (2016). Critical Loads of nitrogen and their exceedances, 78 pp., Berne, Federal Office for the Environment (FOEN).
- Spiecker, H. et al. (1996). Growth Trends in European Forests. Springer-Verlag, New York, 372 pp.

- 15. Braun, S., Schindler, C. und Rihm, B. (2017). Science of the Total Environment 599-600, 637-646.
- Göttlein, A., Baier, R. und Mellert, K. H. (2011). Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 182, 173-186.
- 17. CLRTAP (2016). Mapping Critical Loads for Ecosytems. Chapter V of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. Update 13/01/2017. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution,
- 18. de Witte, L. C. et al. (2017). Science of the Total Environment 605-606, 1083-1096.
- 19. Braun, S. et al. (2003). Water Air and Soil Pollution 142, 327-340.
- 20. UNECE (2017). Mapping Critical Levels for Vegetation, 66 pp., Bangor, UK, Center for Ecology & Hydrology (CEH).
- 21. Skelly, J. et al. (1987). Diagnosing Injury to Eastern Forest Trees. A manual for identifying damage caused by air pollution, pathogens, insects and abiotic stresses. Pennsylvania State University, University Park, 122 pp.
- 22. Mills, G. et al. (2011). Atmospheric Environment 45, 5064-5068.
- 23. Braun, S., Schindler, C. und Rihm, B. (2014). Environmental Pollution 192, 129-138.
- 24. OFEV (2016). Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL), Bundesamt für Umwelt.