

Maryam LARSANOVA  
Madeline CHAMBLAY  
Cédric JUNG

## Travail Personnel Encadré



*Photographies prises au Donon le 22 janvier 2017*

**Le dépérissement des conifères vosgiens est-il encore lié principalement aux pluies acides ?**



# Sommaire

<b>Introduction</b>	3
<b>I) Le dépérissement des conifères</b>	4
a) Historique	4
b) Etat des lieux dans les Vosges	8
<b>II) Les effets des pluies acides sur les conifères</b>	20
a) Le phénomène des pluies acides	20
b) Conséquences sur les conifères	24
c) Effets sur l'environnement des conifères	32
<b>III) Impact des autres facteurs à l'origine du dépérissement</b>	38
a) Les parasites	38
b) Les précipitations	44
c) L'ozone	45
d) Les champignons	46
<b>Conclusion</b>	49
<b>Médiagraphie</b>	50
<b>Sources des illustrations</b>	60

## **Introduction:**

Les conifères sont des arbres souvent résineux qui ont un feuillage composé d'aiguilles qui persistent en hiver, comme leur nom l'indique ils ont pour fruit un cône. Le dépérissement des conifères est un terme utilisé pour décrire l'affaiblissement de ces arbres. Il peut s'agir de jaunissement, de problèmes localisés ou de mortalité massive d'arbres. Il est observé depuis les années 1970 en Allemagne. Au début des années 80 a été constaté un important dépérissement dans les Vosges. Les Vosges possèdent une grande variété de conifères, tels que le sapin blanc aussi appelé le sapin pectiné, l'épicéa commun, le pin sylvestre, le douglas. Ces arbres sont sources de richesse dans la région, ce dépérissement a donc inquiété, la cause principale a été attribuée aux pluies acides. Cela a donné lieu à un programme de recherche interministériel DEFORPA, DÉpérissement des FORêt attribué à la Pollution Atmosphérique. Les pays de l'Est étaient à cette époque accusés de produire les gaz à l'origine des pluies acides dans les Vosges. De manière générale, ces gaz sont produits aujourd'hui par les pays utilisant le charbon tel que les États-Unis et la Chine. Depuis 1980, des mesures limitant l'émission de ces gaz ont été prises, nous nous sommes demandés si le dépérissement des conifères vosgiens est encore principalement lié ou non aux pluies acides.

# I. LE DÉPÉRISSEMENT DES CONIFÈRES

## a) Historique

Dans un premier temps, nous allons présenter l'historique du dépérissement des conifères Vosgiens en donnant des dates clés et ce dans un ordre chronologique.

Tout d'abord, il faut noter que les parcelles de forêt modifiées par l'homme sont plus sujettes au dépérissement. Notamment les forêts reboisées par des espèces d'arbres qui n'étaient pas présents à l'origine. L'Épicéa par exemple a été utilisé pour reboiser du XIX<sup>ème</sup> au XX<sup>ème</sup> siècle des terrains, car il avait une croissance plus rapide, et donc plus rapidement rentable. Cependant par la suite, on s'est rendu compte qu'il était inadapté. De plus les peuplements n'étaient plus mixtes. D'autre part, les arbres présents sur des parcelles anciennement déboisées pour l'élevage sont plus sensibles au dépérissement du fait de l'appauvrissement du sol par l'élevage.

En 1976 des vents violents dominants de l'est ont endommagé la forêt vosgienne. Pendant une dizaine d'années de 1972 à 1982 a été observé une diminution de la croissance des sapins des Vosges qui coïncide avec la période de sécheresses : nous pouvons alors parler d'un "creux".

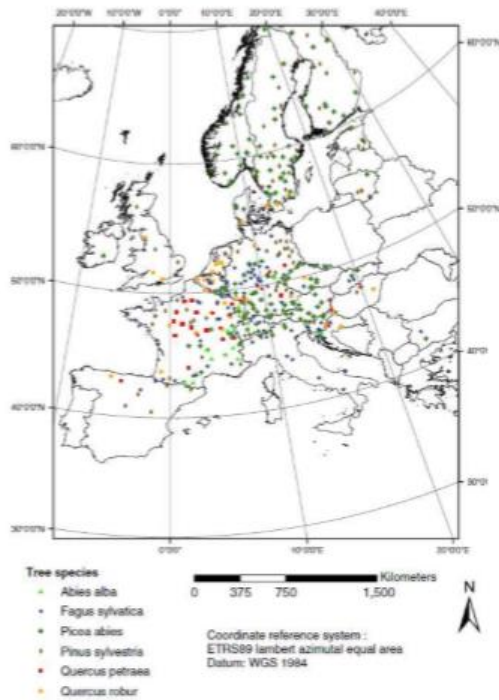
C'est en 1983 que l'on a vraiment commencé à s'inquiéter du phénomène de dépérissement des conifères vosgiens suite à une aggravation de la défoliation et des jaunissements des sapins ainsi qu'une acidité de la pollution atmosphérique. C'est donc l'année pendant laquelle il y a eu une réelle prise de conscience quant aux problèmes du dépérissement des conifères. Il a été constaté que ce dépérissement était plus particulièrement prononcé dans les Vosges en Alsace. Ces problèmes se traduisent par des jaunissements des feuilles ou épines des conifères concernés.

Entre 1984 et 1985, les chercheurs ont constaté que le jaunissement des conifères observés en 1983 s'était aggravé.

Suite à l'observation des défoliations principalement sur des résineux dans le massif des Vosges a été créé en 1984, le programme français de recherche sur les causes du dépérissement des forêts (DEFORPA). Ce programme s'occupe de divers problèmes comme l'évaluation des dommages et la relation avec les conditions écologiques, la caractérisation du climat de pollution dans les forêts, les actions directes des pollutions des polluants atmosphériques et l'effet de la pollution acide par l'intermédiaire du sol. Nous pouvons de plus noter que le DEFORPA a existé de 1984 à 1991. Le réseau RENECOFOR, Réseau Nationale de suivi à long terme des ECOSystèmes FORestiers, est créé en 1992 pour pouvoir surveiller le dépérissement et prévenir de grandes phases de dépérissement à long terme.

Comme nous pouvons le voir sur les cartes suivantes que le réseau RENECOFOR

est constitué de 102 placettes composées de différents types d'arbre: dans les Vosges, les Sapins, les Épicéas et les Pins sylvestres sont ainsi surveillés. Ce réseau constitue la partie française d'un ensemble européen de 800 placettes. Cela a permis l'étude à l'échelle européenne de la santé des forêts sur le long terme.



Spatial distribution of the ICP forests level II intensive monitoring plots of the main tree species in Euro

800 placettes

## Niveau 2 : RENECOFOR

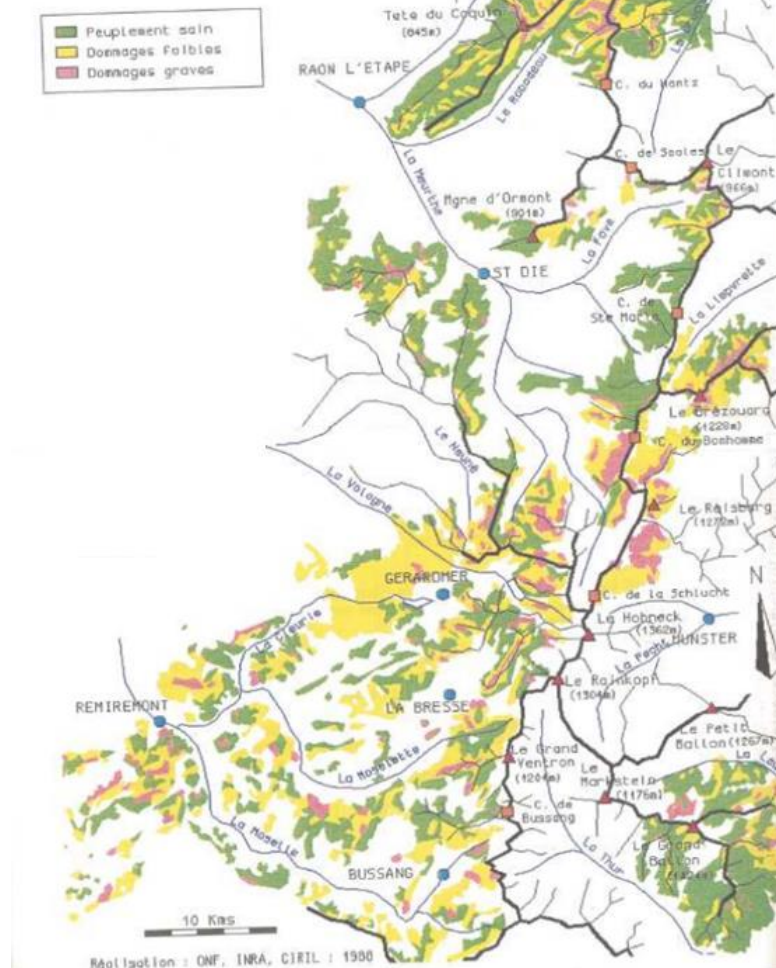
### Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers, ONF

- Hêtre (20)
- Chêne sessile (19)
- Chêne pédonculé (9)
- Epicéa (11)
- Pin sylvestre (14)
- Chêne pédonculé/sessile (2)
- Sapin (11)
- Pin maritime (7)
- Douglas (6)
- Pin laricio (7)
- Mélèze (1)



102 placettes

## Répartition du dépérissement dans le Massif Vosgien en 1987



En 1987, les résultats de l'inventaire de l'état de la santé des forêts confiés à l'ONF, Office National des Forêts, aux centres régionaux de la propriété forestières et au CEMAGREF, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural et des Forêts, sont connus. En effet, on peut voir sur cette carte réalisée par Guy Landmann la répartition des dommages forestiers dans le massif vosgien. Le jaunissement lors de cette année se manifeste toujours sans pour autant s'étendre davantage. On constate grâce à ce document que la plupart du massif vosgien est concerné. L'année 1987 a été une année stable, il ne faut pas oublier que le climat a été favorable en cette année: pluviométrie normale, sans période sèche.

Entre 1989 et 1992, ont été constaté des dépôts atmosphériques, des neiges, des brouillards et polluants gazeux.

En 1993, la réalisation d'analyses chimiques des eaux pluviales et analyses pédologiques (des sols) ont prouvé que la pollution atmosphérique est l'un des facteurs aggravant le dépérissement des forêts vosgiennes.

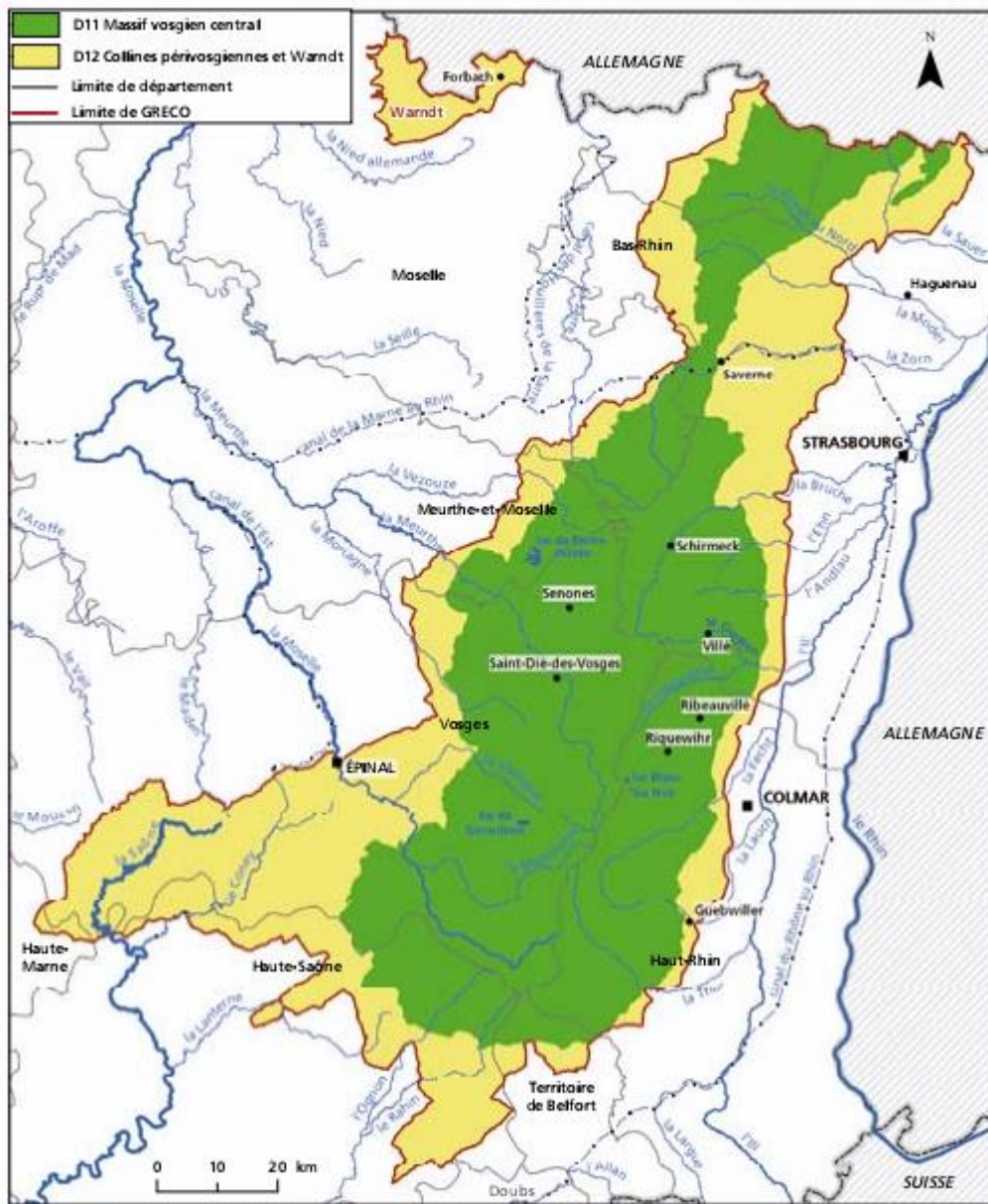
L'année 1999 est marquée par une tempête, le 26 décembre, qui a fait des dégâts importants dans les forêts des zones touchés. La forêt des Vosges en faisait partie.

En 2003, il y a eu des canicules et des sécheresses, le dépérissement est ainsi plus important.

Deux ans plus tard, dans un article datant du 20 décembre 2005, « *Les Échos* » titre “Les forêts toujours hantées par les pluies acides” qui montre que le risque d'une crise comme celle des années 1980 est possible à nouveau mais dû cette fois à de multiples facteurs.

## b) Etat des lieux actuel dans les Vosges

L'IGN, l'Institut National de l'information Géographique et forestière, a fourni en 2011 un découpage de la France en grandes régions écologiques, parmi lesquelles il y a les Vosges. Cette région est délimitée selon les limites apparaissant sur la carte suivante.



Dans les Vosges, on parle de dépérissement pour un conifère à partir du moment où l'on voit un jaunissement ou une grande perte de feuillage ainsi qu'un ralentissement de la croissance et de la vitalité de l'arbre. Ce dépérissement a été constaté à la fin des années 1970 par les Allemands dans la forêt noire, forêt voisine des Vosges également concerné. Cette une du célèbre magazine allemand *Der Spiegel* témoigne de l'importance du phénomène, le titre "Der Schwarzwald stirbt" signifiant "La Forêt Noire meurt".

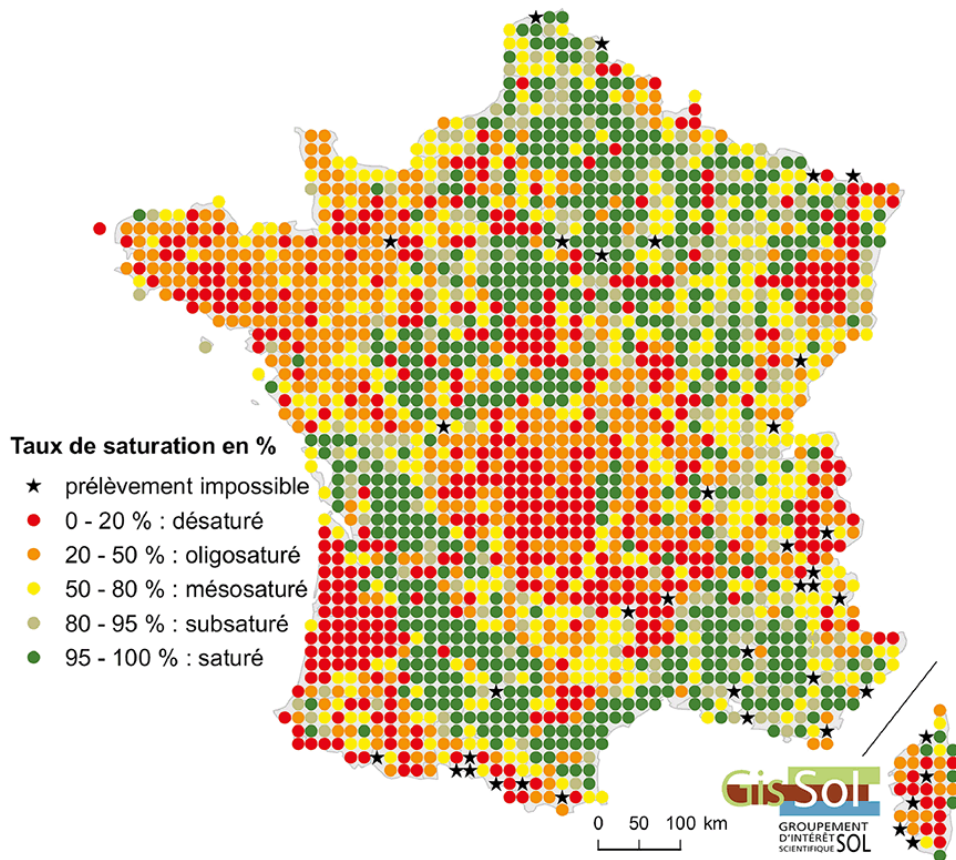




En 1982, les scientifiques déclarent que les forêts des Vosges et de la Forêt Noire sont victimes des pluies acides. Parmi les facteurs qui favorisent le dépérissement, il y a le fait que le sol soit très pauvre et acide à l'origine. Ils ont un taux de saturation naturellement très faible.

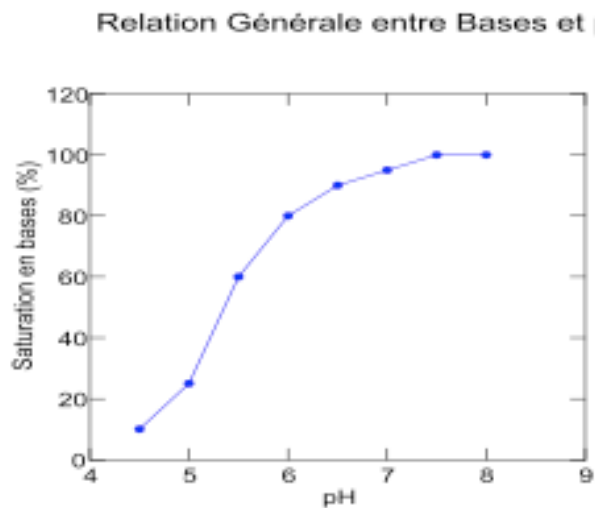
Le taux de saturation, également appelé saturation de base, est obtenu grâce au rapport S/T. T est la capacité d'échange cationique ou CEC, cela correspond à la somme des cations échangés par le sol. Certains de ces cations sont dit acides comme ceux issues de l'aluminium et l'hydrogène, d'autres comme ceux du potassium, magnésium et du sodium sont dit nutritifs. Quant à S, il s'agit de la somme des cations nutritifs échangeables, ceux disposés sur la surface du sol. Donc, le taux de saturation indique la présence de ces cations.

On peut voir que les Vosges sont une des zones les moins saturées de France allant jusqu'à être désaturé comme en témoigne la carte ci-dessous.



Source : Gis Sol, RMQS, 2010.

Un tel taux de saturation, illustre le fait que les sols vosgiens sont très acides comme on peut le voir sur le graphique suivant:



Sur la carte ci-dessous fournie par l'IFN, Inventaire Forestier National, on peut

constater deux ensembles : les Vosges gréseuses au Nord et à l'Ouest ainsi que les Vosges cristallines au Sud. Dans les Vosges gréseuses, la texture des sols est sableuse tandis que dans les Vosges cristallines, elle est limoneuse. Les sols sableux sont pauvres en réserve d'eau, en éléments nutritifs tandis que les sols limoneux ont une grande capacité à retenir l'eau. Les grains de ces sols ont une taille intermédiaire entre les sables et les argiles. Le principal désavantage des sols limoneux est qu'ils s'appauvrissent rapidement au fil des années.

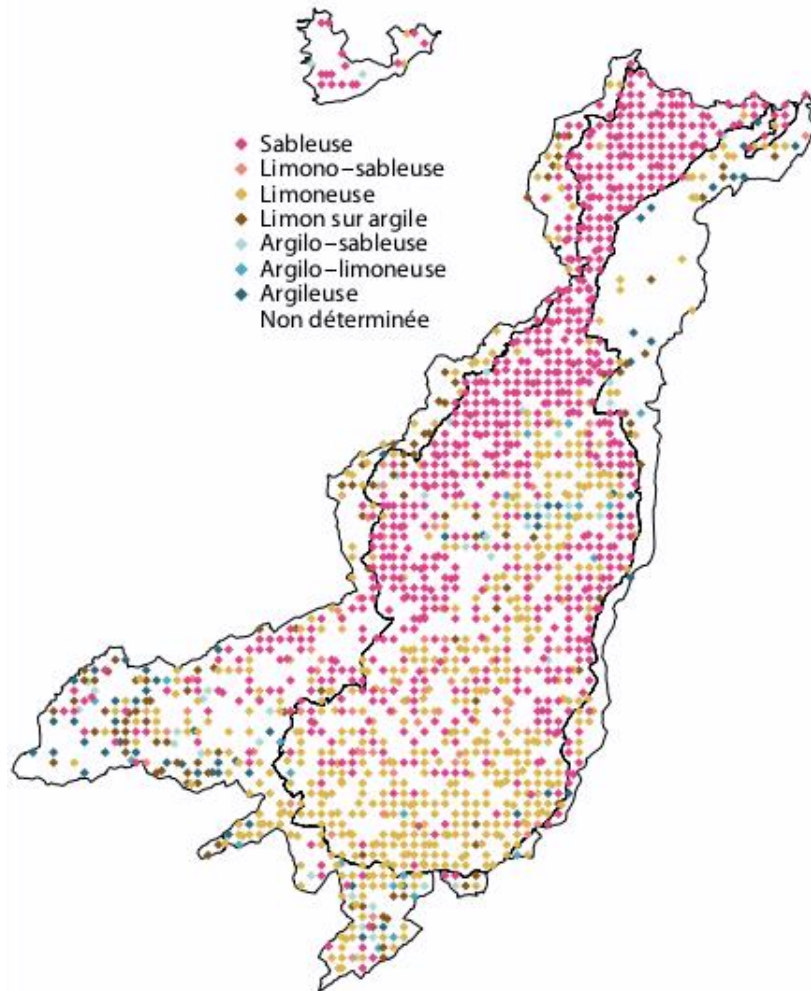
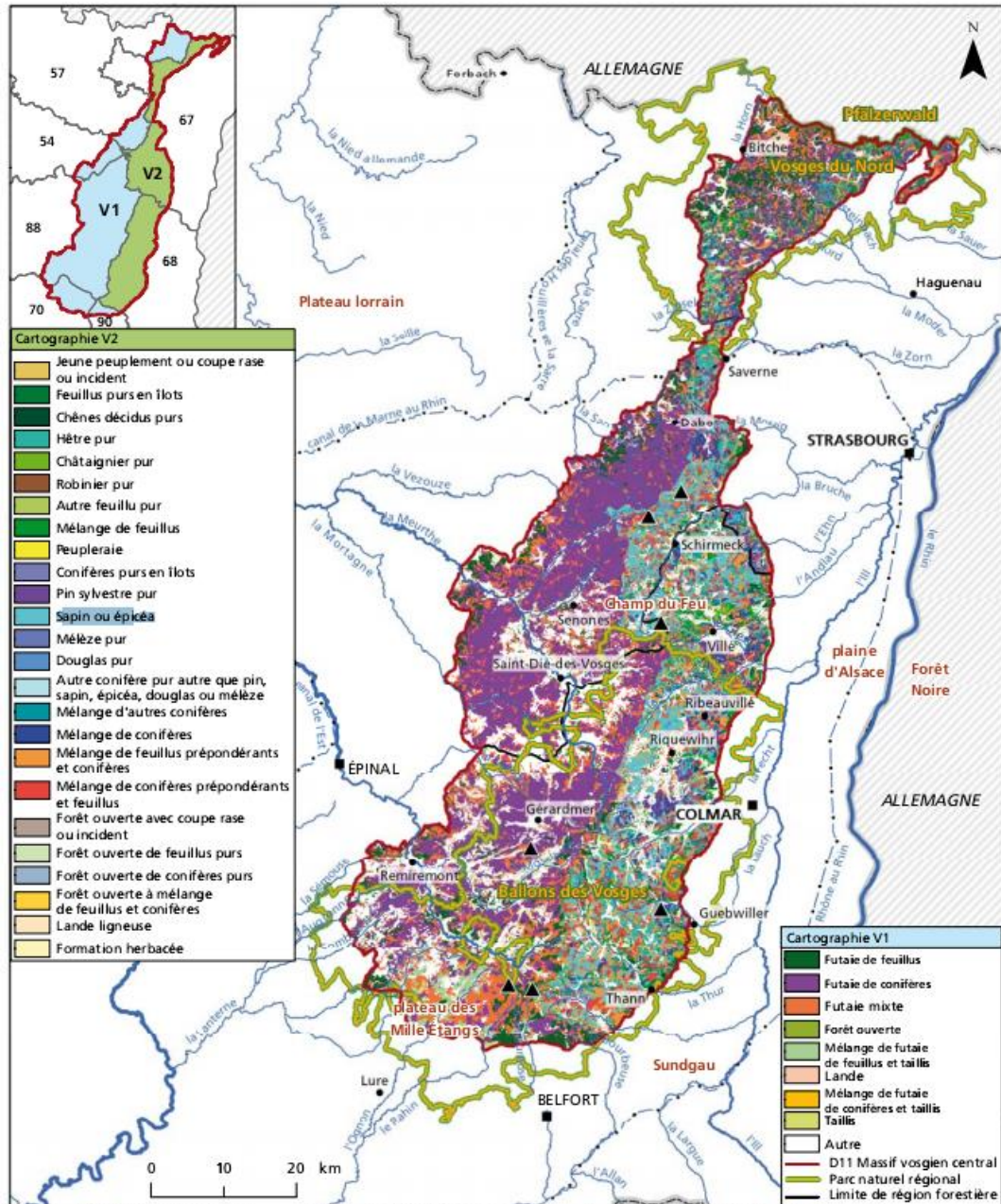


Fig. 26 : Les types de texture du sol en forêt de production hors peupleraie



Sources : BD CARTHAGE® IGN Agences de l'Eau, MNHN, BD Forêt® V2 (départements 67 et 68 - 2007) et BD Forêt® V1 (départements 54 et 57 - 2001, 70 et 90 - 2003, 88 - 2004) IGN.

On remarque ainsi sur cette carte des différences au niveau de la répartition et du type de conifères et de peuplement.

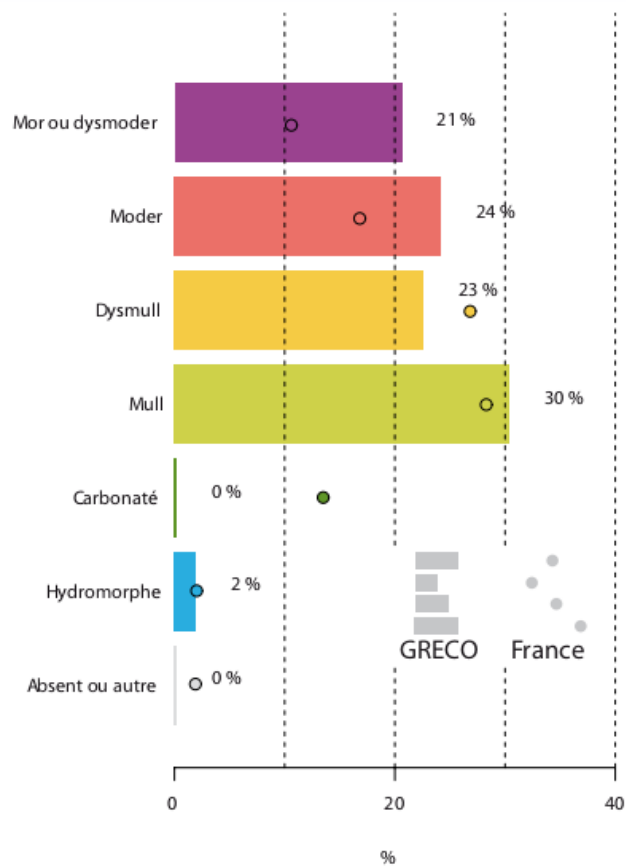


Fig. 25 : Répartition de la surface de la forêt de production hors peupleraie par type d'humus

Le document ci-dessus, fournis par l'IFN en 2010, représente la proportion de chaque type d'humus dans les Vosges par les barres, GRECO signifiant grande région écologique, et en France par des points. On peut donc voir que l'humus des types, mor, moder sont présents dans les Vosges et ont une proportion supérieure à la moyenne française. Ces deux types d'humus ont une minéralisation très lente. Cela signifie, en pédologie et agronomie, que la décomposition de la matière organique est très lente. Le mor provient d'une litière difficilement décomposable et peu nutritive tandis que le moder provient d'une litière forestière de sapins pauvre en herbe mais ayant une activité organique plus importante. L'activité organique varie en fonction du pH, en effet l'humus sera de meilleure qualité si ce sont des bactéries qui décomposent la matière organique plutôt que des champignons. Or sur les sols acides, ce sont les champignons qui s'en occupent. Selon la carte suivante également fournie par l'IFN, la majorité, 73% des sols des Vosges sont brunifiés: c'est-à-dire ayant un pH entre 5 et 6. 12% des sols sont podzolisés ce qui est équivalent à un pH inférieur à 5. D'où la présence des humus mor et moder dans les Vosges.

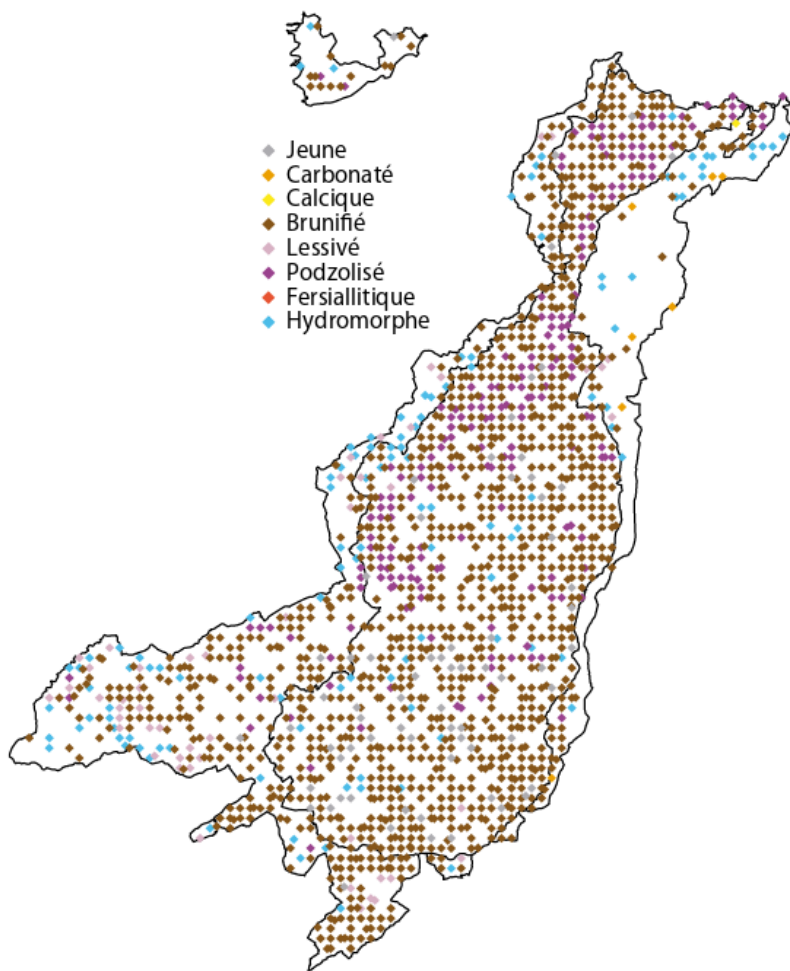


Fig. 22 : Les types de sol en forêt de production hors peupleraie

Le but du travail pratique que nous avons réalisé était de constater la différence de valeur du pH entre différents sols selon qu'ils soient couverts par des feuillus ou des conifères.

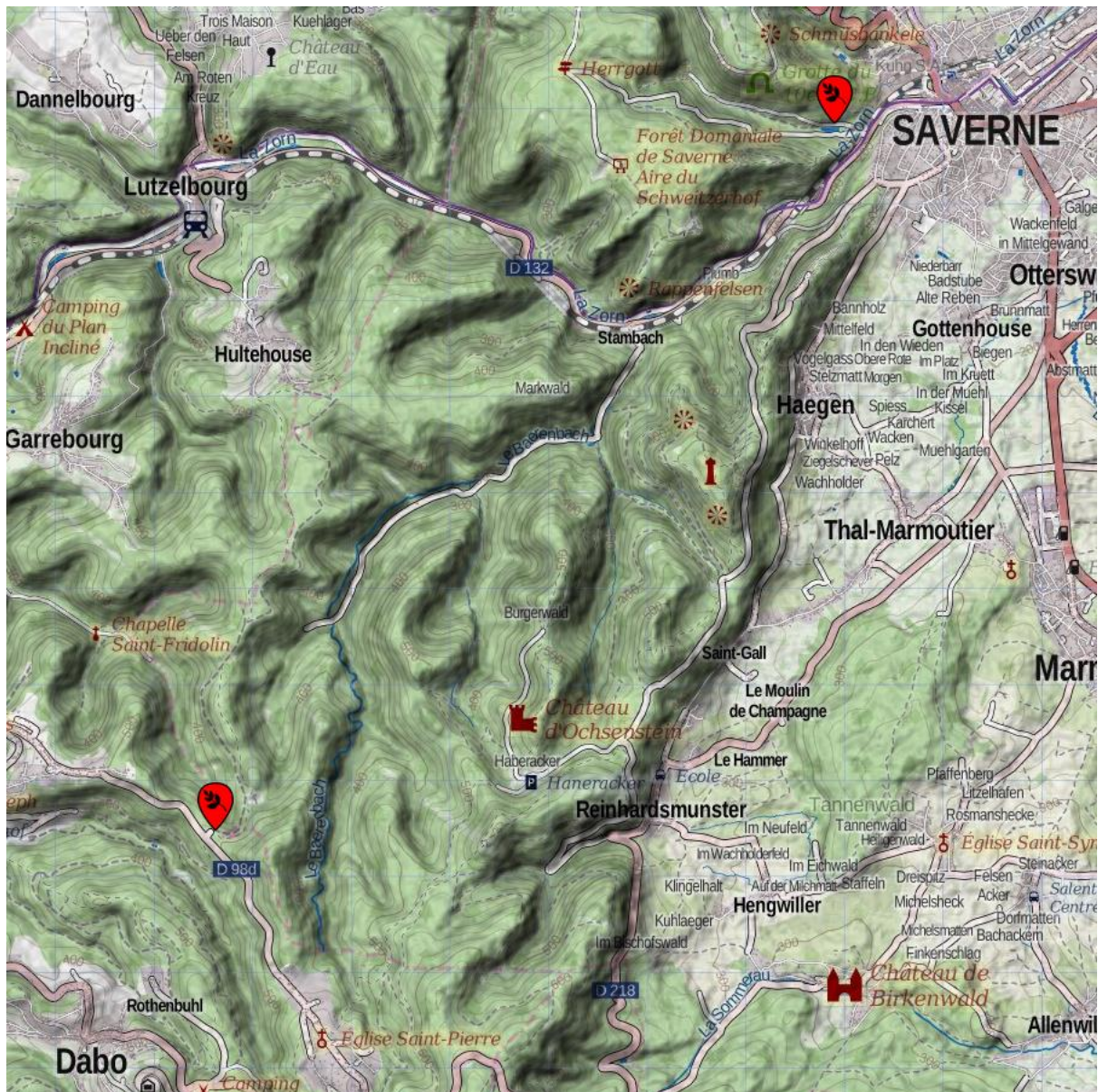
Numéro	Lieu	Espèce d'arbre	pH
1	Fontaine Mélanie	Epicéa	4,8
2	Fontaine Mélanie	Hêtre	4,8
3	Fontaine Mélanie	Sapin	5,3
4	Kempel	Bouleau	4,5
5	Kempel	Chêne	5,0
6	Kempel	Sapin	5,4

Tableau représentant les résultats de la mesure du pH des sols en fonction des espèces d'arbres et du lieu

Les stations, où les prélèvements de sols ont été effectués, se situent à des altitudes différentes dans les Vosges moyennes. La station dite "Kempel" se situe à Hellert dans la commune de Dabo proche de la Maison Forestière Kempel à 490 m d'altitude. D'autre part, la station nommée "Fontaine Mélanie" se situe à Saverne, en contrebas du ruisseau de la Fontaine Mélanie à 220 m d'altitude. L'intérêt d'avoir pris des stations à des altitudes différentes est de voir par la même occasion la différence entre les valeurs de pH en fonction de l'altitude. En effet, les sols en altitude devraient être plus pauvres en cations du fait du lessivage des sols par les précipitations. L'acidité des sols en altitude devrait par conséquent être plus grande en altitude.

Sur l'image ci-dessous, on peut voir le rocher de Dabo depuis Hellert.





Sur la carte ci-dessus extraite d'OpenStreetMap, les stations sont chacune indiquées par un marqueur rouge, on constate la différence d'altitude. À vol d'oiseau, les stations se situent à 10 km l'une de l'autre, elles subissent donc les mêmes conditions climatiques. Les prélèvements ont été effectués le mercredi 28 décembre 2016. Ce jour-ci était précédé d'une période froide avec des températures entre  $-2^{\circ}\text{C}$  et  $6^{\circ}\text{C}$  avec de légères précipitations.





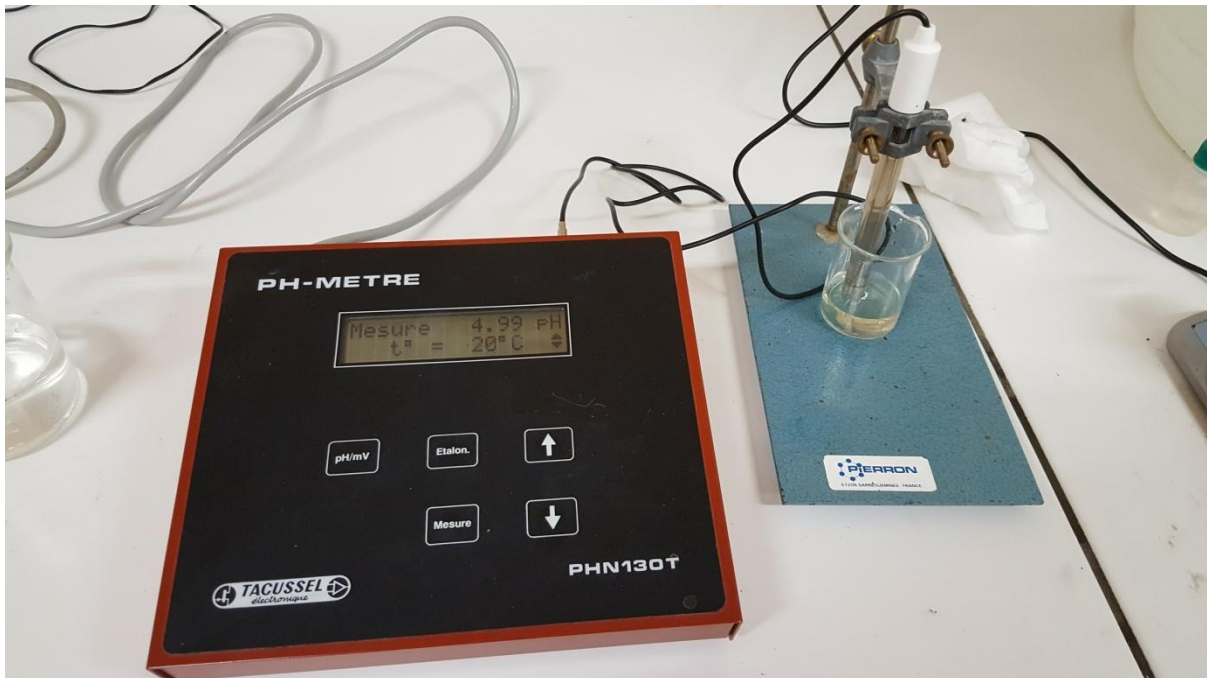
Le prélèvement a été effectué de la manière suivante: on a écarté à l'aide d'une pelle les feuilles et différentes aiguilles afin de pouvoir récupérer le sol. Sur la photographie ci-dessus, on peut voir un exemple de prélèvement au niveau d'un sapin. Les lieux où ont été effectués chacun des prélèvements sont entourés d'une seule essence d'arbre de manière à avoir le sol influencé par une seule espèce.

Pour mesurer le pH des sols, avant toutes choses, nous avons calibré le pH-mètre avec une solution tampon à pH=7 et pH=4. Puis nous avons utilisé, le protocole expérimental suivant:

- Prendre 20g de chaque sol
- Verser chaque échantillon dans un bécher et y ajouter 100 ml d'eau distillée
- Agiter la solution à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 15 à 20 min
- Filtrer la solution
- Mesurer avec le pH-mètre
- Nettoyer le pH-mètre avec de l'eau distillée entre chaque mesure sans le calibrer à nouveau



Sur la photo précédente, nous pouvons voir une solution juste avant filtration. Nous avons choisi de retenir uniquement deux chiffres significatifs pour la valeur du pH, sa mesure n'étant pas précise au centième, du fait de l'étalonnage qui est nécessaire. Sur la photo suivante, nous pouvons voir le pH-mètre utilisé et le filtrat.



Les résultats nous confirment bien que les sols des Vosges gréseuses sont acides en forêt puisque nous avons uniquement des valeurs de pH inférieures à 7 et même inférieur à 5,5.

D'autre part on peut remarquer néanmoins que le pH le plus bas obtenu est celui mesuré à partir du sol pris au pied de bouleaux avec 4,5. En effet, la présence du bouleau est logique: c'est une essence d'arbre pionnière, du fait que ce soit souvent la première essence d'arbre à s'implanter dans un milieu, puisque le bouleau se contente de peu. On le

retrouve notamment dans les tourbières. Cela atteste donc de la pauvreté du sol au niveau de la Maison Forestière Kempel.

Nous pouvons aussi constater au niveau de la Fontaine Mélanie que le sol est très acide, par exemple, par le fait que le sol du hêtre a un pH de 4,8. Or nous savons que les valeurs du pH des sols sur lesquels on retrouve le hêtre sont situées entre 4 et 7,5. Nous pouvons donc en conclure qu'on se trouve dans les valeurs les plus acides qu'un hêtre supporte.

Comme ce que nous avons pensé avant de réaliser la mesure du pH, le sol au niveau de l'Épicéa est très acide à 4,8 de pH. Cependant nous pensions avoir des valeurs de pH plus basses que ce que nous avons obtenu pour le Sapin que ce soit au niveau de la station Kempel ou de la Fontaine Mélanie, néanmoins elles coïncident avec la valeur moyenne du pH dans les Vosges qui se situe majoritairement entre 5 et 6.

Cependant, nous n'avons pas pu montrer que le pH variait en fonction de l'altitude la différence entre les valeurs étant très faible.

Aujourd'hui, ont été constaté des baisses de près de 20% à 60% de l'acidité directe, pluies, neiges et brouillards acides, par rapport à la fin des années 1980. Malgré tout près de 10 % des pluies sont toujours plus acides que la normale.

D'après Denis GIRAULT, que nous avons contacté, chef du pôle interrégional Nord-Est de la santé des forêts Grand Est, la crise dû aux pluies acides est maintenant pour l'essentiel résorbée, même si des arbres d'aspect dépérissant peuvent être localement observés sur l'ensemble du massif.

## II. LES EFFETS DES PLUIES ACIDES SUR LES CONIFÈRES

### a) Le Phénomène des Pluies Acides

Pour définir ce qu'est une pluie acide, il faut tout d'abord définir le principe de l'acidité. L'acidité d'une substance est mesurée grâce au pH, soit le potentiel hydrogène. Il est défini dans une solution aqueuse sur une échelle de 0 à 14. Ainsi, lorsqu'une solution a pour  $pH=7$ , elle est dite neutre. De 0 à 7 elle est acide et enfin de 7 à 14 elle est basique.

Un acide est, selon le chimiste danois Brønsted, donneur d'ions  $H^+$ . Tandis qu'une base les accepte. Un milieu acide est caractérisé par la présence d'ions oxonium,  $H_3O^+$ , qui proviennent de la fixation d'une molécule d'eau,  $H_2O$ , à un proton  $H^+$ . Une solution aqueuse est donc considérée comme acide si elle contient plus d'ions  $H_3O^+$  que l'eau pure.

À l'inverse, un milieu basique est caractérisé par la présence d'ions hydroxydes  $HO^-$  formé par la perte d'un proton  $H^+$  par une molécule d'eau. L'eau étant neutre elle contient la même quantité de  $H_3O^+$  et de  $HO^-$  ayant pour chacun une concentration molaire de valeur  $10^{-7}$  mol/L.

Le pH est lié à l'activité de la concentration molaire en ions oxonium,  $H_3O^+$ . L'activité chimique correspond à la concentration active d'une espèce chimique. En effet, à cause des interactions entre le soluté et le solvant, la disponibilité d'une espèce chimique peut être différente. Plus simplement, la valeur du pH est directement liée à la concentration en ions oxonium, de la manière suivante:

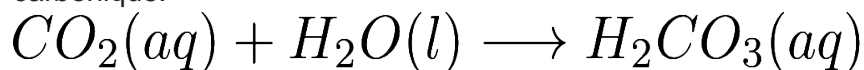
$$[H_3O^+] = 10^{-pH}$$

D'où:

$$pH = -\log[H_3O^+]$$

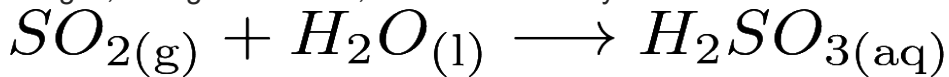
La composition de l'air peut être modifiée par des polluants qui ont la plupart du temps des conséquences néfastes pour l'environnement. Ils sont d'origines naturels, comme les pollens ou d'origine anthropique, c'est-à-dire dû à des modifications de la nature par l'homme ou des activités de l'homme. Ces derniers proviennent notamment de l'industrie, de l'industrie des transports, et de l'agriculture.

Les polluants ayant un impact sur l'acidité des pluies et des retombées atmosphériques sont, le dioxyde de soufre et le dioxyde d'azote. Cependant, les pluies n'ont pas un pH neutre: le dioxyde de carbone  $CO_2$ , une fois dissout dans l'eau forme de l'acide carbonique.

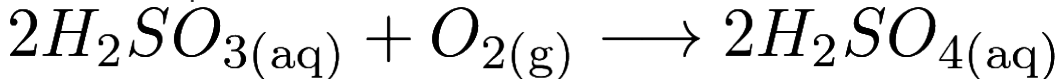


Ainsi de manière générale, le pH des pluies est d'environ 5,7, c'est-à-dire légèrement acide.

Le dioxyde de soufre,  $SO_2$ , est produit à partir de la combustion des combustibles fossiles tels que le fioul ou le charbon. Il peut également être produit lors des émissions de soufre et lors des éruptions volcaniques. Par la suite, une fois présente au niveau des nuages, il réagit avec l'eau,  $H_2O$ . Ainsi le dioxyde de soufre devient de l'acide sulfureux:

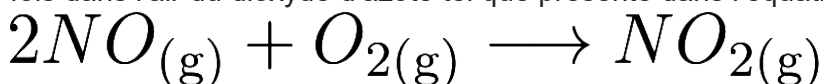


Il peut même y avoir une seconde réaction possible avec le dioxygène, produisant ainsi de l'acide sulfurique:

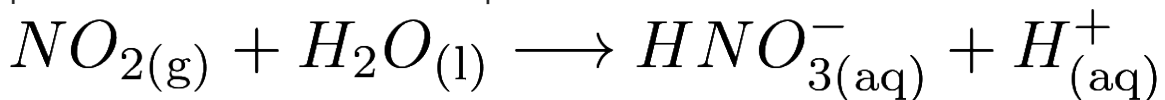


L'acide sulfurique est composé de deux ions  $H^+$  et un ion sulfate,  $SO_4^{2-}$ . Ce dernier a une grande influence au niveau de l'acidification des sols.

L'oxyde d'azote,  $NO_x$ , provenant des moteurs thermique des voitures, devient une fois dans l'air du dioxyde d'azote tel que présenté dans l'équation bilan suivante.



De la même manière, le dioxyde d'azote réagit avec l'eau,  $H_2O$ , présente dans les nuages pour former cette fois de l'acide nitrique.



Le vent peut transporter sur de longues distances, séparément ou les polluants et nuages ensemble. Ce mécanisme peut ainsi être schématisé de la manière suivante.

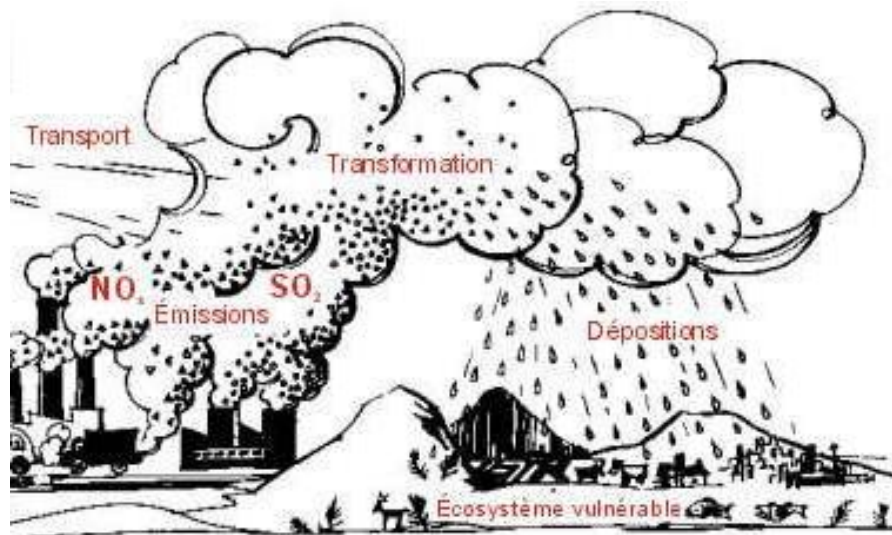


Schéma de l'acidification des pluies et de leur transport

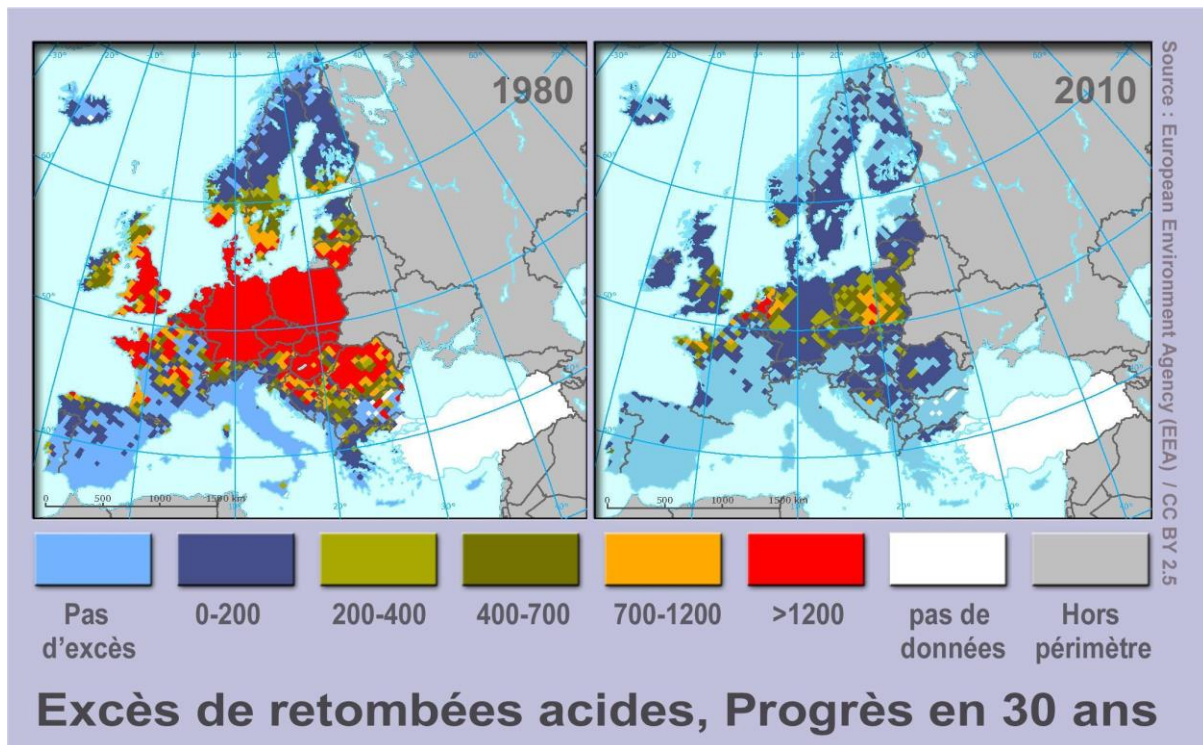
On peut prendre pour exemple le Triangle Noir, *Schwarzes Dreieck* en allemand, qui est une région à cheval entre l'Allemagne, la Pologne et la République tchèque caractérisée par un haut taux de pollution. Cette expression a été utilisée pour la première fois dans les années 1980. Cette région présente une zone industrielle de 60 kilomètres de long émettant principalement du dioxyde de soufre. En effet la région est connue pour avoir dans ses sols d'importantes ressources naturelles et minérales: la chaîne de montagnes présente dans cette région s'appelle même Mont Métallifères du fait de leurs richesses en argent, étain, cobalt nickel et fer. Cette chaîne de montagnes bloquait l'air et les polluants émis, formant ainsi rapidement des pluies acides et ayant des répercussions directes sur la région. Au plus bas, ces pluies ont eu un pH de 2,7. Après la chute des régimes communistes en Europe en 1989,

les trois pays ont mis en place des réformes pour mettre fin aux émissions. Cette mesure a eu pour conséquence une importante amélioration de la qualité de l'air en Europe.



Effets des pluies acides sur la forêt du Mont de la Jizera en République tchèque.

On peut voir, ci-dessus un exemple photographié en 2006 d'effet des pluies acides de la région du Triangle Noir sur la forêt du Mont de la Jizera à la frontière polono-tchèque. Néanmoins, il y a eu une diminution des excès de retombées acides en Europe, d'après l'Agence Européenne pour l'Environnement, comme on peut le constater sur le document ci-dessous qui compare les excès de retombées acides entre 1980 et 2010. On peut notamment observer qu'en 1980, il y avait un fort taux d'excès de l'Alsace à la Pologne, tandis que le taux d'excès était plus faible sur la même région en 2010. Cela s'explique par l'arrêt des usines de l'Europe de l'Est et par des mesures prises à l'échelle européenne pour réduire les émissions de  $\text{SO}_2$  à partir de 1994 et le  $\text{NO}_x$  à partir de 1988. Ces mesures sont contenues dans la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. Selon Ulrich, il y a eu une baisse de 92% du  $\text{SO}_2$  entre 1980 et 2012 et une baisse de 48% de  $\text{NO}_x$ . La diminution des émissions de ce dernier est plus lente que celle du soufre.



Pour confirmer la baisse de l'acidité des pluies dans les Vosges, nous avons mesuré le pH de l'eau de pluie et de la neige grâce à un pH-mètre. Ces échantillons ont été pris entre le 26 et le 30 janvier 2017 alors qu'il y avait un vent d'Est. La neige de Phalsbourg du 26 janvier a étonnamment un pH neutre de valeur 7. Les neiges de Danne-et-Quatre-Vents et de Asswiller du 27 janvier et la pluie de Phalsbourg du 30 janvier ont tout trois un pH légèrement acide de valeur 6. Ces valeurs correspondent à celles d'une pluie sans polluant tel que le dioxyde d'azote ou le dioxyde de soufre. Le pic de pollution de particule en suspension PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>, à cette période n'a pas d'incidence sur l'acidité de l'eau.

## b) Conséquences sur les conifères

Les pluies acides ont en effet un impact direct et indirect sur les forêts et l'environnement. D'abord, direct car cette pluie touche les feuillages des conifères ; ensuite indirect par le biais des sols. En effet, les sols suite à ces pluies, s'acidifient. Les conifères se nourrissant des sols subissent ainsi l'acidification des sols. Dans un premier cas, nous allons nous intéresser aux effets directs de la pluie acide sur les conifères.

En effet, cette pluie une fois en contact avec le feuillage des conifères entraîne des changements au niveau des molécules de ces derniers.

Notons d'abord que cette pluie provoque des dommages au niveau de la cuticule des feuilles. La cuticule est une couche de cutine, qui est une substance de nature lipidique qui recouvre l'épiderme chez les végétaux, et de cires qui recouvre les feuilles des végétaux. Elle empêche la pénétration de dioxyde de carbone. On peut la voir sur le schéma suivant :

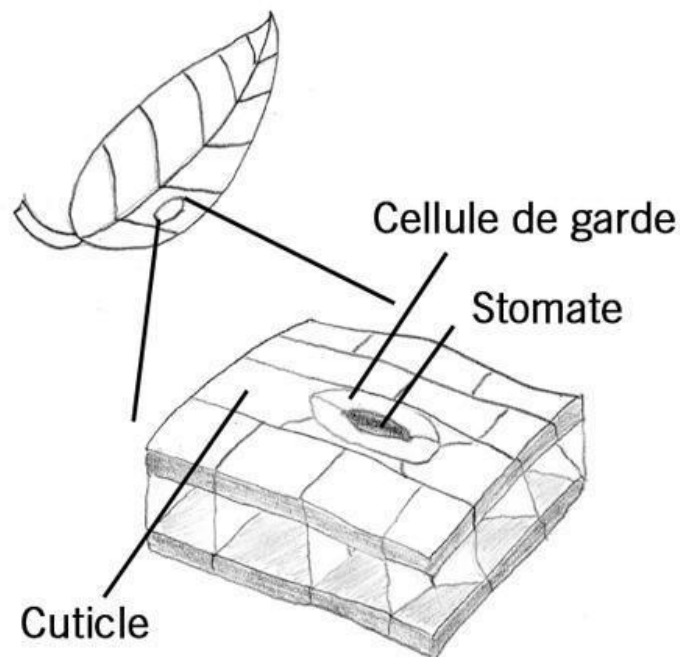


Schéma d'une coupe transversale d'une feuille

Sur la cuticule sont disposés des stomates autour desquelles se trouvent des cellules de garde, qui sont des orifices permettant des échanges gazeux comme le dioxygène  $O_2$ , ou le dioxyde de carbone  $CO_2$ . Les cellules qui se trouvent à la surface ont un contact direct avec les substances nocives, définies ci-avant, et donc subissent des dommages suite à l'évaporation d'eau. Il y a une perte de contrôle des stomates altérant le taux de transpiration et les processus d'échange gazeux. Cela est dû à la déformation des cellules de garde. Les conifères deviennent de ce fait plus susceptibles aux pathogènes.

Les pluies acides empoisonnent les cellules du feuillage des conifères car, les substances acides diffusées dans les stomates ou cuticules vont provoquer l'apparition de nécroses, qui sont une forme de dégât cellulaire menant à la mort prématurée et non



programmée des cellules dans le tissu vivant, ou marques de sénescence sur les organes foliaires des feuilles. La sénescence est le processus de vieillissement biologique, c'est la suite des changements irréversibles dans un organisme qui aboutit à la mort. Ces pluies peuvent aussi entraîner un dérèglement du métabolisme normal ou de la croissance, dû à la diminution de la photosynthèse, sans toutefois que des nécroses apparaissent.

Les dommages causés aux cuticules et aux surfaces des feuilles en général, mènent à l'accélération du lessivage foliaire des éléments minéraux et substances organiques des feuilles. Le lessivage foliaire étant ici le processus dans lequel l'eau des précipitations supprime les nutriments qui sont à la surface des feuilles.

Le lessivage foliaire ou lessivage des éléments nutritifs au niveau des feuilles est l'un des principaux effets directs des pluies acides. L'accroissement de l'acidité des pluies amène à un lessivage prononcé des ions calciums  $\text{Ca}^{2+}$ , et magnésiums  $\text{Mg}^{2+}$ . Deux chercheurs, Mecklenburg et Ai, ont trouvé que la perte de  $\text{Ca}^{2+}$  des feuilles se produit via un processus passif d'échange d'ions où l'hydrogène  $\text{H}^+$  de la pluie s'échange avec le  $\text{Ca}^{2+}$  foliaire. Les pertes de  $\text{Ca}^{2+}$  au niveau des feuilles dépendent donc des concentrations de  $\text{H}^+$  dans la pluie. Toutefois, on remarque que le potassium  $\text{K}^+$  diminue quand la concentration en  $\text{H}^+$  augmente. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les ions  $\text{H}^+$  endommagent le mécanisme de capture de  $\text{K}^+$  dans les cellules des racines qui habituellement sont protégées par des ions  $\text{Ca}^{2+}$ . Les ions  $\text{Ca}^{2+}$  sont facilement lessivés car ils sont substitués par des ions  $\text{H}^+$ . Malgré tout, ce phénomène reste une hypothèse qui n'a pas encore été prouvée. Des échanges de cations au niveau de la cime des arbres auraient donc eu lieu, les ions  $\text{H}^+$  se substituant à différents cations.

En 1976, les expériences menées par Abrahamsen et Ai montrent que le filtrat des pluies acides résultant du passage à travers les feuilles était plus acide que celui des pluies incidentes. Ce filtrat présentait plus de chlore, de sodium et de sulfate, cet enrichissement est probablement dû au lessivage des dépôts secs. Quant à ce qui est de l'enrichissement du filtrat en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ , il serait dû au lessivage de substances excrétées par les feuilles, soit les substances éliminées de l'organisme des feuilles.

Le pH des pluies affecte la quantité de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ . Cependant on ne remarquera aucune lésion sur les feuilles. Le document ci-dessous montre qu'effectivement, le pH de la pluie a un impact sur les ions présents. Il change de façon importante les quantités de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$  retrouvées dans un filtrat sous un couvert d'épinettes, autre nom des Épicéas.

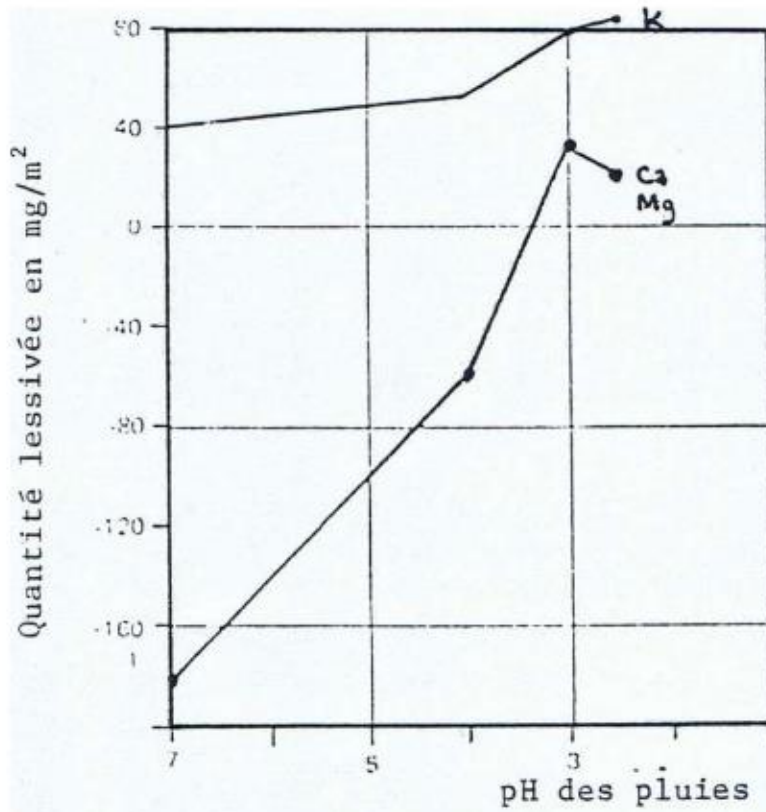


FIGURE 15 - Effet du pH des pluies simulées sur le lessivage de Ca, Mg et K sous le feuillage d'épinettes

Source: Abrahamsen, G. (1976)

Le graphique ci-dessus représente la quantité lessivée en  $\text{mg/m}^2$  en fonction de la valeur du pH des pluies. On constate que plus le pH est faible plus la quantité lessivée en  $\text{mg/m}^2$  augmente. Le  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  passent ainsi de  $-100 \text{ mg/m}^2$  pour un pH de 7 à  $20 \text{ mg/m}^2$  pour un pH d'environ 3,3. Quant au  $\text{K}^+$ , il passe de  $40 \text{ mg/m}^2$  pour 7 de pH à environ  $85 \text{ mg/m}^2$  pour environ 3,3 de pH. Notons donc suite à cela que plus le pH est faible, ici 3, plus la quantité lessivée sera importante.

L'érosion des cuticules, interférant avec le fonctionnement normal des cellules de garde rend les organes foliaires plus vulnérables au stress environnemental comme par exemple la sécheresse ou encore les polluants atmosphériques.

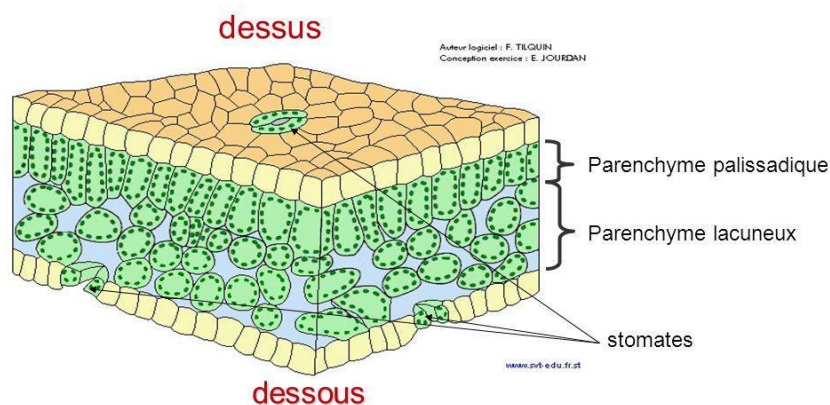
Le soufre apporté sur les stomates par les pluies acides forme de l'acide sulfurique. Cette substance toxique difficile à éliminer pour une plante rend les feuillages jaunâtre, c'est le jaunissement, et va jusqu'à faire tomber les feuilles. Les effets de ces pluies sont donc visibles, on peut le voir sur la photo ci-dessous.



Jaunissement de conifères dû aux pluies acides

D'autre part, en 1956 deux chercheurs, Solberg et Adams, ont montré que le fluorure, forme ionique du fluor, et le dioxyde de soufre détruisent le mésophiles spongieux et l'épiderme inférieur des feuilles. Le mésophile est la partie intérieure d'une feuille et le spongieux, ou parenchyme lacuneux, est l'un des deux tissus parenchymateux se trouvant dans le mésophile. Le schéma suivant nous permet de voir l'emplacement de ces derniers.

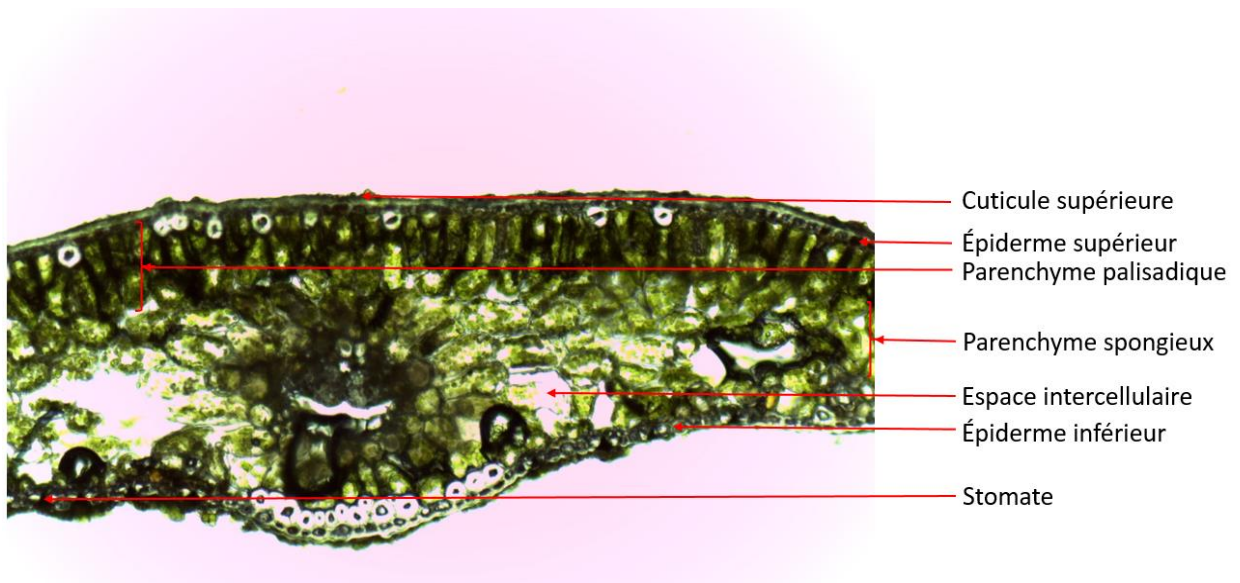
### Schéma de la coupe transversale de la feuille



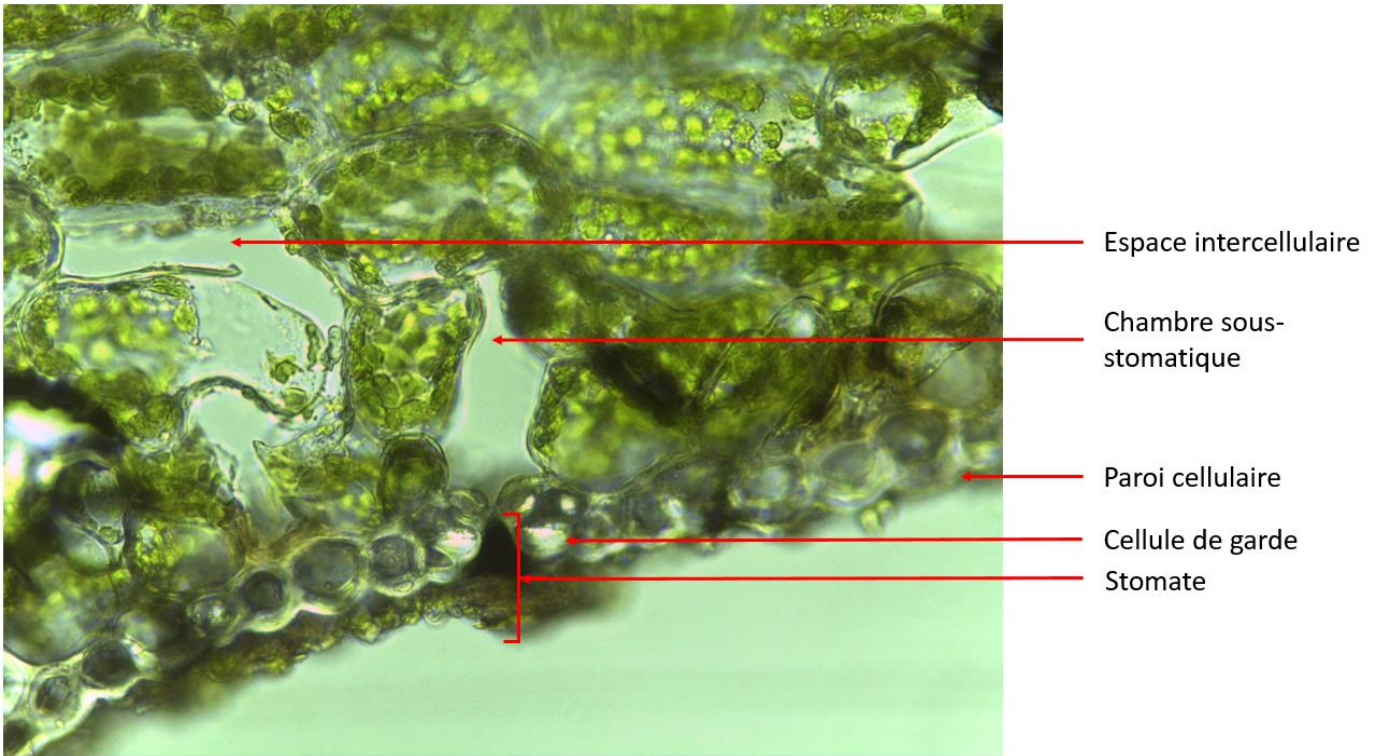
On a cherché à observer les aiguilles d'un conifère au microscope. Pour cela, nous avons pris une aiguille d'un Sapin de la forêt de Trois Maisons à Phalsbourg. Nous avons réalisé une coupe transversale de l'aiguille. Puis nous avons déposé la découpe et ajouté une goutte d'eau distillé entre une lame et une lamelle.



Photographie de la face intérieure de l'aiguille de Sapin



Photographie de la coupe transversale d'une aiguille de Sapin



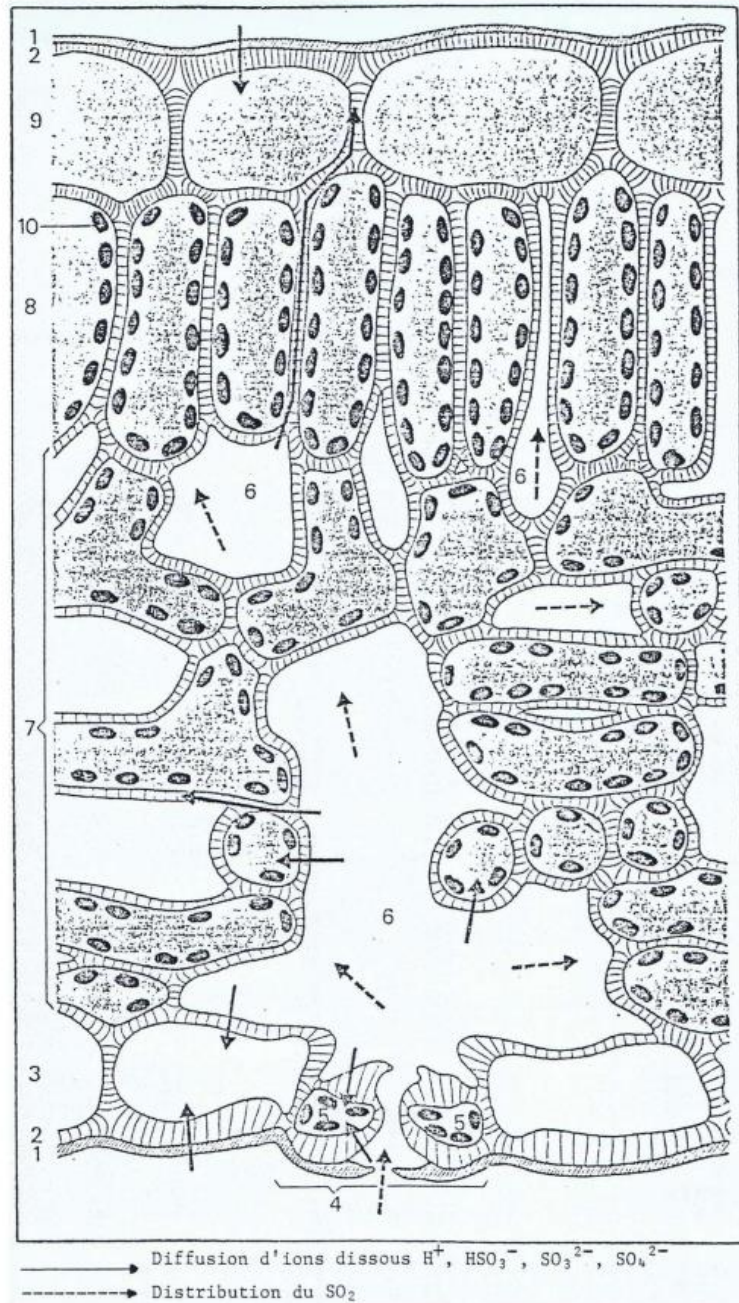
Photographie de la coupe transversale d'une aiguille de Sapin au niveau d'un stomate

FIGURE 16 - Schéma simplifié de la capture et de la distribution du SO<sub>2</sub> dans une feuille de plante verte.

Légende

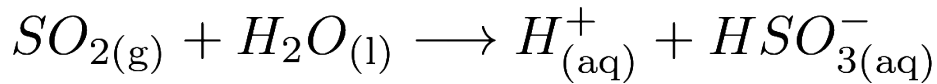
Knabe, W (1976)

- 1) cuticule
- 2) paroi cellulaire
- 3) épiderme inférieur
- 4) stomates
- 5) cellules de garde
- 6) espaces intercellulaires
- 7) parenchyme spongieux
- 8) parenchyme palisadique
- 9) épiderme supérieur
- 10) chloroplastes (les autres constituants cellulaires ont été omis)

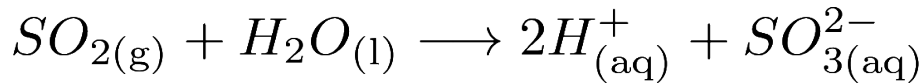


Au niveau des cellules, le SO<sub>2</sub> pénètre dans les feuilles par le biais des stomates, qui eux, s'ouvrent ou se ferment grâce aux cellules de garde soit une cellule réniforme constituant le stomate. Notons que réniforme définit un objet qui a une forme de rein ou haricot. Une fois arrivé dans la feuille, le dioxyde de soufre, SO<sub>2</sub> se propage dans les espaces intercellulaires.

Le  $SO_2$  se dissout dans l'eau présente dans les feuilles au niveau des parois cellulaires, formant ainsi un proton et de l'acide sulfureux  $HSO_3$ , ou deux protons et du trioxyde de soufre  $SO_3$  en fonction du pH.



Ou



En effet, les conifères qui sont touchés par les pluies acides deviennent vulnérables aux maladies, ils sont plus sensibles. De plus, ces derniers risquent la mort car ils sont privés de leur source nutritive. Cette sensibilité est due à deux phénomènes : tout d'abord suite à une perturbation de la photosynthèse puis suite à la décomposition de la chlorophylle. Les feuilles et aiguilles perdent peu à peu leur couleur verte et deviennent jaunes, oranges ou encore rouge.

Par la suite, les pluies acides entraînent l'acidification du sol en modifiant l'absorption des sels minéraux et en provoquant le jaunissement du feuillage, également accentué par la sécheresse.

### c) Effets sur l'environnement des conifères

Les sols sont les premiers à subir les conséquences des précipitations acides. Or les conifères et les arbres, de manière générale, obtiennent leurs nutriments des sols par le biais des racines bien qu'une partie minime de ces éléments est obtenue directement des dépôts atmosphériques par les feuilles. Les conifères ont besoin d'azote, N, calcium, Ca, potassium, K, phosphore P, magnésium, Mg.

éléments	Symbole	Déficient	Adéquate	Optimal
Azote	N	< 10 - 13	13 - 15	17 - 19
Phosphore	P	< 1,2 - 1,5	1,5 - 1,9	> 1,9 - 2,5
Potassium	K	< 3,0 - 4,0	4,0 - 6,0	> 6,0
Calcium	Ca	< 0,5 - 1,0	1,0 - 3,0	> 3,0 - 5,0
Magnésium	Mg	< 0,6	0,7 - 1,0	> 1,0 - 1,4

Tableau représentant les concentrations limites de macroéléments pour les différents statuts nutritionnels des épicéas dans les aiguilles d'un an.

Concentrations en mg/g poids sec. D'après Bonneau, 1988.

Le tableau ci-dessus montre les cinq principaux éléments, aussi appelé macroéléments, présents dans les feuilles et leurs concentrations. Quand il y a une carence en certains éléments, ce qui correspond au statut nutritionnel "déficient", il y a un affaiblissement de l'aiguille et en fonction des éléments manquant un jaunissement de celle-ci. En effet, le diagnostic foliaire, c'est-à-dire le fait d'analyser le dosage des éléments dans les feuilles, est un moyen fiable pour détecter le manque de minéraux. On peut cependant noter que la variation des concentrations des éléments dans une aiguille varie au cours de son âge.



Le sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$  est apporté par les pluies acides comme expliqué précédemment. Celui-ci est la seule forme sous laquelle le soufre peut être absorbé. Ce dernier est en effet nécessaire à la formation d'acides aminés.

Cependant, lorsque le sulfate se dépose sur le sol, soit il reste sous forme de sulfate, soit il est adsorbé par les minéraux insolubles tels que l'oxyde de fer et d'aluminium. Lorsque les ions sulfates sont présents dans le sol, leurs charges négatives sont compensées par les cations tels que le calcium et le magnésium.

En résumé, les dépôts atmosphériques modifient les composants chimiques du sol et ainsi leurs réactions chimiques. De ce fait, les pluies acides augmentent la concentration en aluminium dans les sols ce qui provoque la perte d'éléments nutritifs comme le calcium et le magnésium.

Le calcium est nécessaire aux conifères. Ceux-ci les absorbent par leurs racines sous la forme  $\text{Ca}^{2+}$ . D'une part en absence de calcium, il peut y avoir un ralentissement de la croissance des arbres ainsi que des potentielles pertes d'aiguilles. D'autre part, le calcium en tant que cation basique le plus présent en quantité dans les sols, joue un rôle essentiel afin de résister à l'acidification. En revanche, il est sujet au lessivage. Le lessivage est le transport d'éléments par l'eau de pluie, cette dernière transporte ainsi les ions des couches supérieures du sol vers les couches inférieures.

De son côté le magnésium, est absorbé par les racines sous la forme  $\text{Mg}^{2+}$ . Pour la santé des conifères, cet élément est essentiel puisque le jaunissement de l'épicéa et du Douglas peut être, dans certains cas, dû à une carence en magnésium. Il se distingue des autres jaunissements par le fait qu'il y a une transition brutale de la partie jaune de la feuille à la partie verte. Tout comme le calcium, il est sensible au lessivage.

L'absence du potassium absorbable par les plantes sous la forme du cation  $\text{K}^+$  peut aussi provoquer le jaunissement du feuillage notamment au bout des aiguilles. Il renforce aussi la résistance de l'arbre aux maladies et à la sécheresse.

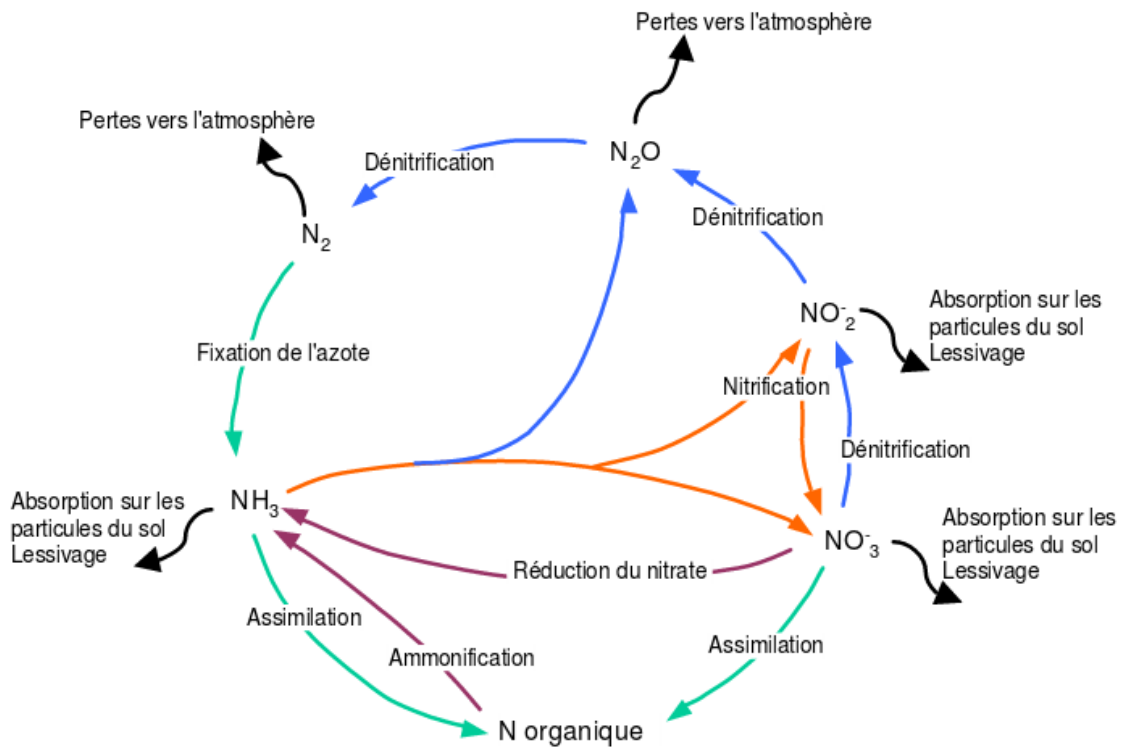


Figure 2-1: Schéma du cycle de l'azote dans les écosystèmes terrestres et aquatiques, d'après Baretta-Bekker et al., 1998. Flèches bleues : réactions biochimiques par lesquelles l'azote a tendance à quitter le sol ou les eaux. Flèches vertes : processus par lesquels l'azote est assimilé par la matière organique. Flèches rouges : réactions biochimiques par lesquelles l'azote reste dans l'écosystème. Flèches noires : processus géochimiques par lesquels l'azote quitte l'écosystème.

Ce document ci-dessus représente schématiquement le cycle de l'azote dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. L'azote est apporté par les dépôts atmosphériques. Parmi les formes sous lesquelles l'azote peut se trouver dans la nature, les seules pouvant être utilisées par les végétaux sont les nitrates  $\text{NO}_3^-$  et l'ammonium  $\text{NH}_4^+$ . Elles sont absorbées en grande majorité par les racines. L'ammoniac  $\text{NH}_3$  peut cependant être oxydé et donc transformé en ions nitrite  $\text{NO}_2^-$ . Cette étape est appelée la nitritation. Elle est effectuée par des bactéries telles que la bactérie *Nitrosomonas* qui possède des membranes capables d'utiliser les électrons issus de la nitritation. Cette dernière est décrite par l'équation suivante:

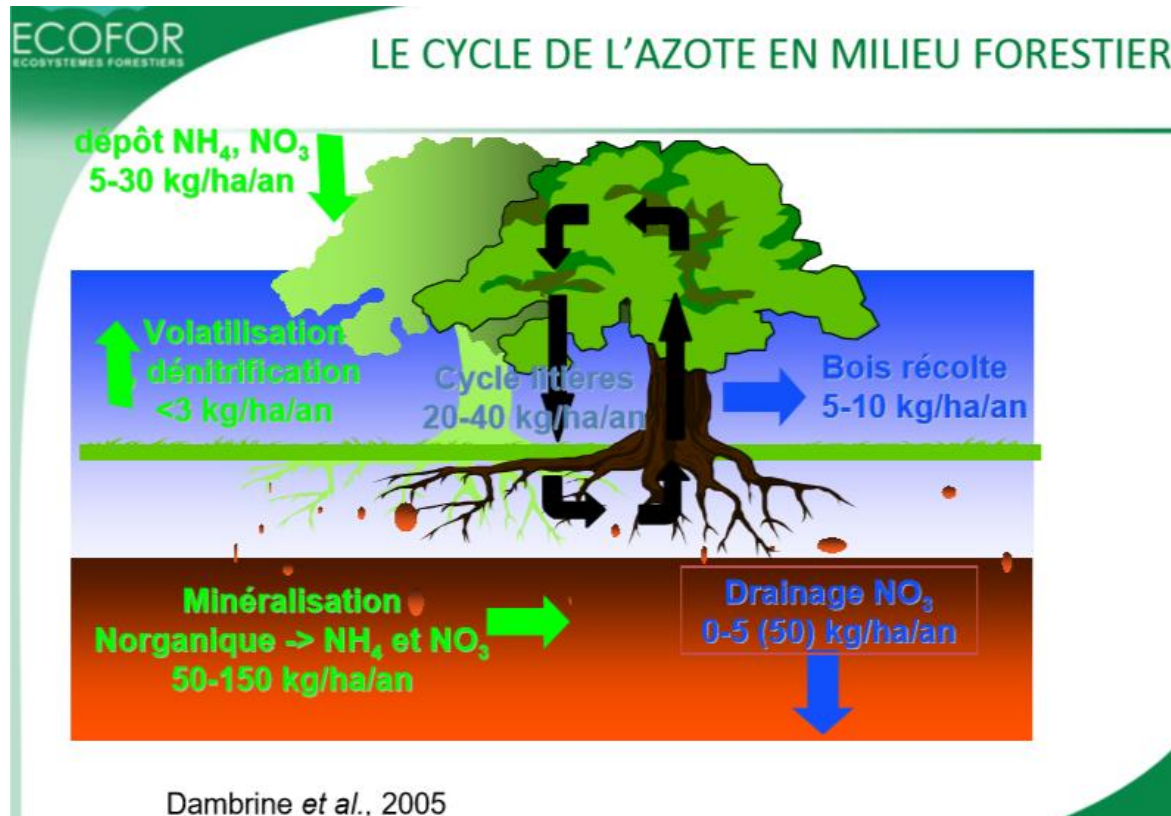


Après cette réaction il peut y avoir une seconde réaction qui produit des ions nitrates  $\text{NO}_3^-$ , c'est la nitratation. Elle est réalisée par la bactérie *Nitrobacter* qui utilise le même fonctionnement que le *Nitrosomonas* pour produire de l'énergie.



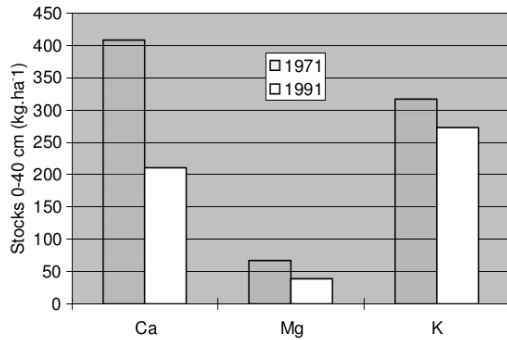
L'ensemble de ces deux réactions est appelé la nitrification, comme elles libèrent des protons ce sont par conséquent des réactions acidifiantes.

Le cycle de l'azote en milieu forestier peut être représenté par le schéma suivant fournis par ECOFOR et réalisé d'après Dambrine, 2005.



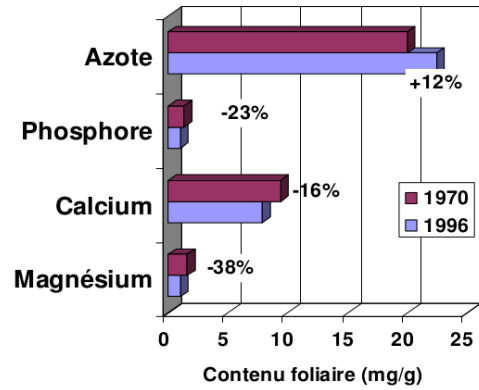
Étant donné que les dépôts atmosphériques azotés stimulent la croissance et augmentent les attentes en éléments nutritifs, les arbres sont alors dans une situation où les besoins en calcium et en magnésium sont élevés mais où les ressources sont fortement réduites, ce qui aggrave les carences nutritionnelles.

D'après le document suivant, on constate que la crise des pluies acides qui a eu lieu dans les années 1980 a eu un fort impact sur la quantité de cations des sols. Ainsi on constate que dans les hêtraies entre 1971 et 1991 il y a eu une baisse des stocks de cations phosphore, calcium et magnésium. Cette baisse est directement observée au niveau du contenu des feuilles où il y a eu entre 1970 et 1996 -23% de phosphore, -16% de calcium et -38% de magnésium contre une augmentation de 12% d'azote présent dans les feuilles.



**Ca : -15 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> Mg : -2 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>**

Thimonier *et al.*, 2002



Dusquenay *et al.* 2000

Graphiques représentant les pertes de cations dans des hêtraies sur sol acide du Nord-Est de la France et effet nutritionnels

Cette relation a été également démontrée chez les résineux en 1987 lorsque Nys a pu provoquer le dépérissement d'un Épicéa commun dans les Ardennes en apportant une quantité élevée d'azote.

Une des conséquences les plus importantes des pluies acides sur l'environnement est l'acidification des sols ce qui impacte la qualité de l'humus et la disponibilité des nutriments pour les résineux. On peut résumer le mécanisme de l'acidification par le schéma suivant extrait d'une étude de l'INERIS de 2004. On peut y voir deux types de flèches, les flèches rouges favorisant l'acidification et les autres la freinant. La nitrification, expliqué plus haut, bien que phénomène acidifiant n'est par contre pas représenté sur ce schéma.

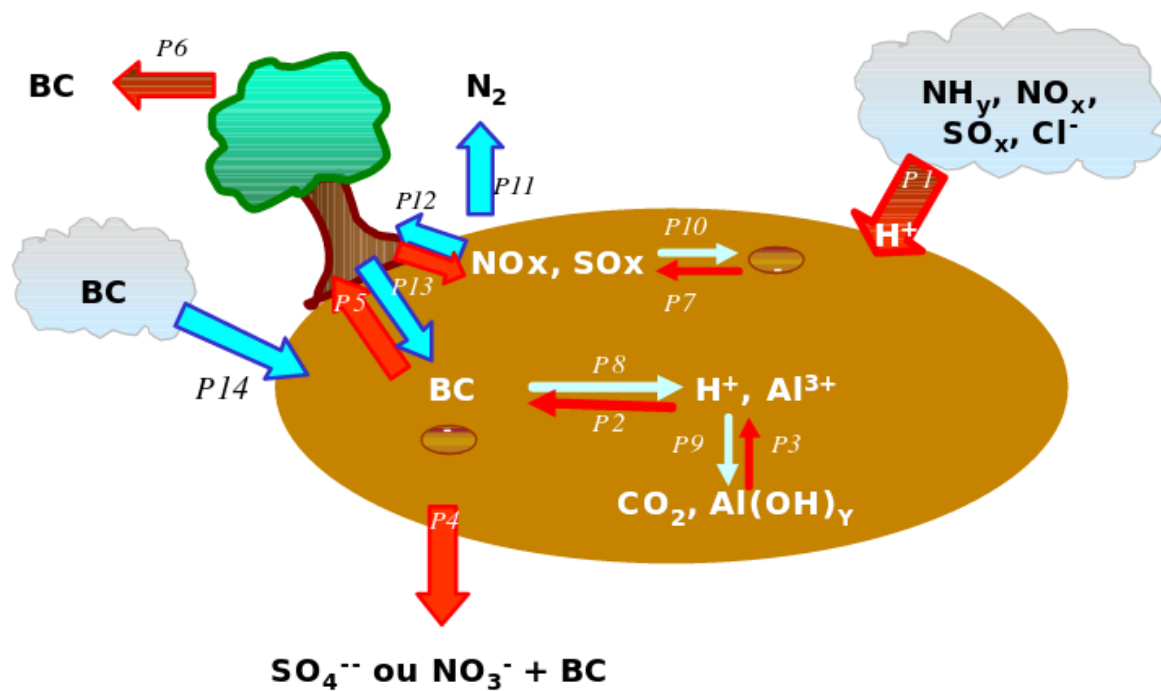


Figure 3-1 : Représentation schématique des principaux processus contrôlant l'acidification du sol. Les flèches rouges symbolisent les mécanismes acidifiants, les bleus les mécanismes freinant l'acidification. Les numéros sont repris dans le texte.

Les dépôts atmosphériques acidifiants sont représentés par le premier processus P1. La perte des cations basiques (BC) Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> et Na<sup>+</sup> par le lessivage avec les ions SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, P4, est un processus non seulement acidifiant mais qui provoque aussi la carence en éléments Mg et Ca chez les végétaux. Ce processus est naturellement compensé or l'apport atmosphérique de BC, P14, n'est plus suffisant lorsque les dépôts atmosphériques acidifiants sont augmentés comme durant la crise des années 1980. D'autre part, on peut aussi souligner que la mauvaise gestion de la forêt, peut amener elle aussi à une perte de BC, P6. En effet, les cations basiques absorbés et stockés dans l'arbre tel que le magnésium et le calcium sont retirés de la forêt lors des récoltes. C'est pourquoi les forestiers laissent volontairement des bois morts au sol pour le renouveler.

### III. IMPACT DES AUTRES FACTEURS À L'ORIGINE DU DÉPÉRISSEMENT

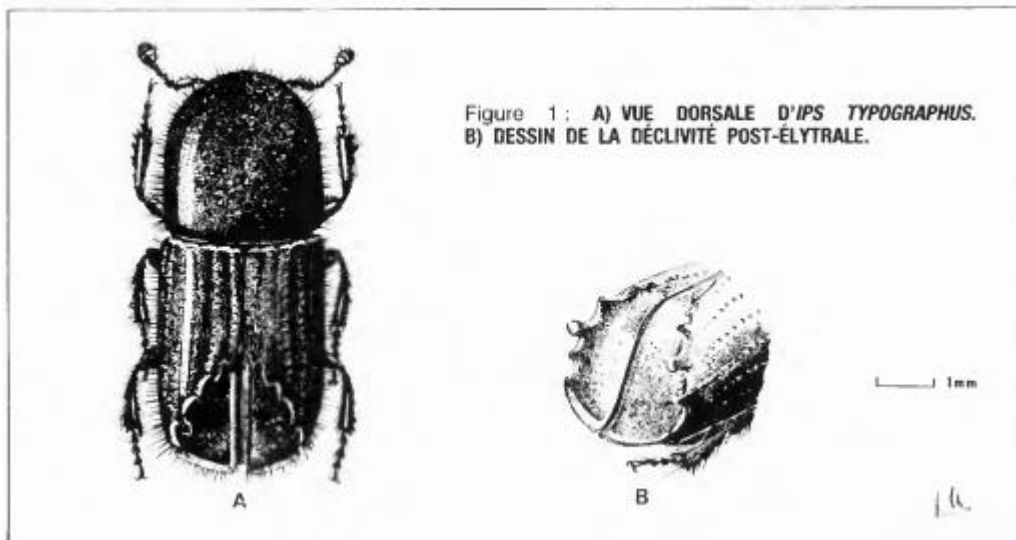
#### a) Parasites

Un parasite est un organisme animal ou végétal qui se nourrit strictement aux dépens d'un organisme hôte d'une espèce différente. Dans notre cas l'hôte est un conifère. Le parasite en se nourrissant du conifère peut entraîner des dégâts sur le conifère pouvant aller jusqu'à sa mort.

Deux groupes d'insectes menacent les conifères, les *Scolytidae* et les *Melolonthinae*. Ces deux groupes d'espèces font partie d'un ordre d'insectes, nommé *Coleoptera*, ce sont donc des coléoptères. Ces derniers possèdent deux paires d'ailes: la première, appelée élytres, servant uniquement de carapace, et protégeant la deuxième qui sert au vol.

Selon l'entomologiste français Alfred Balachowsky, les *Scolytidae* peuvent être divisé en deux groupes, dont la sous-famille des *Ipinae* parmi lesquelles certaines espèces sont nuisibles aux conifères vosgiens. On peut distinguer deux types de Scolytes, ceux qui s'attaquent à des arbres morts et ceux qui s'attaquent à des arbres vivants. Cette dernière attaque est facilitée lorsque l'arbre subit une déficience hydrique, un fort manque d'eau, ou de manière générale en cas d'affaiblissement de l'arbre.

Les Scolytes cherchent dans les arbres des glucides, amidons et protéines pour se nourrir. Les *Ips typographus* par exemple préfèrent l'Épicéa, ils ne s'établissent dans les autres conifères qu'en cas d'absence de l'Épicéa. Cependant dans la majorité des cas, le forestier n'est pas inquiet puisque les Scolytes n'attaquent qu'une partie de l'Épicéa. Parmi ceux-là, les *Pityogenes chalcographus* attaquent, par exemple, uniquement la partie haute des Épicéas. La majorité des dégâts sont provoqués par deux espèces l'*Ips typographus*, aussi appelé le typographe, et le *Dendroctonus mitans*, dit l'Hylésine géant de l'Épicéa.



On peut voir sur cette image, qui est extraite d'un article de la Revue Forestière Française n°37 de 1985, intitulé les Scolytes ravageurs de l'Épicéa, une représentation d'un Typographe. Le Typographe est assez grand par rapport à d'autres espèces malgré sa petite taille, 4 à 6 mm, par rapport à un arbre.

Du fait des impacts économiques qu'à ce Scolyte, on connaît précisément son cycle biologique. Le Typographe passe l'hiver sous la mousse, dans du bois mort, ou sous les écorces. Cette période prend fin quand la température est entre 18 et 20 °C, en avril. En effet, les adultes ne volent qu'au alentour de 18-20°C. En revanche, ils n'attaquent le phloème des arbres, tissu qui contient la sève de l'arbre, qu'à une température d'environ 27-30°C. Le Typographe est polygame comme tous les *Ips*. C'est le mâle qui attaque en premier l'arbre en créant la chambre d'accouplement où il va attirer une femelle. Par la suite lorsqu'elle est fécondée, elle va créer une galerie dans laquelle, à intervalle régulier elle va déposer des œufs. Les larves vont créer à leurs tours des galeries qui seront perpendiculaires à la galerie maternelle. Elles se développent ainsi jusqu'à l'âge adulte où elles sortent de l'arbre, ce qui explique l'élargissement progressif des galeries.



Sur cette photographie, on peut voir une écorce dans laquelle une génération de Typographe s'est développée. Le temps de développement des larves des Typographes dépend surtout de la température. Le temps du stade larvaire passe de 31 jours, pour des larves placées à 14°C, à 9 jours pour des larves placées à 24°C. Ainsi avec une augmentation de 10°C, le temps de développement des larves a été divisé par 3. Ce qui explique le développement plus rapide des scolytes en période de canicule et estivale. Par arbre infecté on peut en compter jusqu'à 60 000. Les dégâts pour la seule année de 1991 s'élèvent à 100 000m<sup>3</sup> d'arbres abattues dans les Vosges, et 212 000m<sup>3</sup> pour 1992.

C'est pour cette raison qu'en 1923, le français Hubault, rédige l'article *Invasions d'insectes xylophages dans les peuplements résineux des Vosges alsaciennes*. La bibliographie de l'article témoigne de l'importance de l'insecte *Ips Typographus* et des insectes xylophages en général sur le rendement des forêts, ainsi sont présent un ouvrage datant de 1844 rédigé à Berlin par Ratzeburg et des articles datant de 1872 écrit à Washington par Howard.

Des articles paraissent régulièrement à propos de forêts infestées de Scolytes dans la presse locale comme en témoigne la photographie ci-dessous tirée d'un article de Vosges matin datant du 7 septembre 2015. Ce qui coïncide avec un été caniculaire où les Scolytes se développent plus vite et où les arbres sont affaiblis. C'est la sciure qui dépasse de l'écorce provenant des cavités qui trahit la présence de Scolytes.

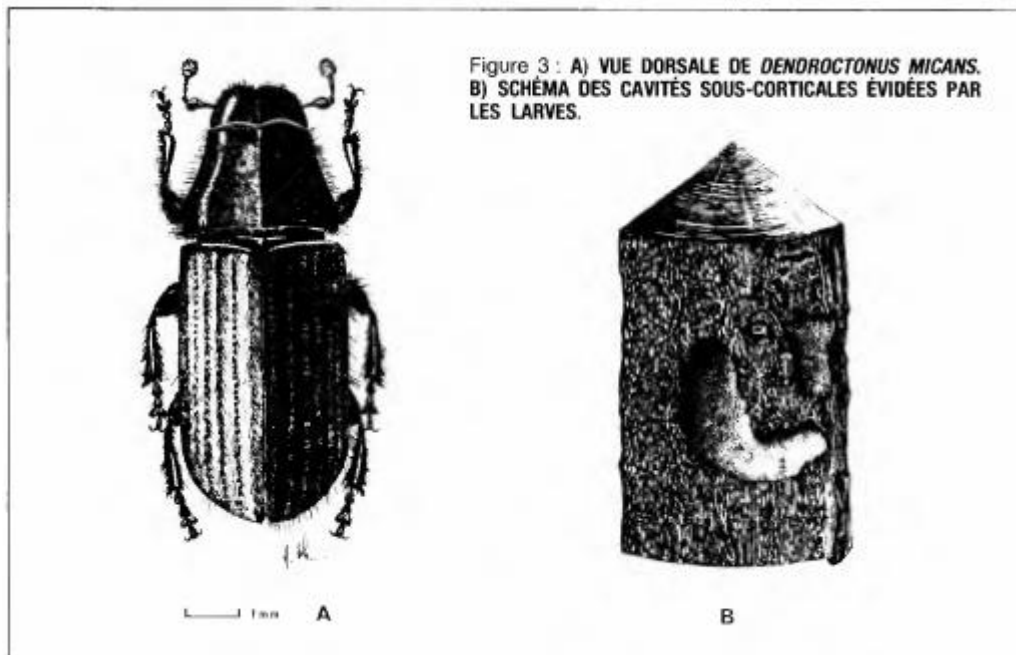




Bernard Pierre, forestier à la retraite constate que ses épicéas étaient infestés

Seuls des mesures préventives quant à la condamnation d'autres arbres existent, les arbres infestés sont broyés ou brûlés. Pour atténuer la contamination on utilise des pièges à Scolytes. Des études sont menées quant à la possibilité d'introduction d'un prédateur supplémentaire aux Scolytes. L'*Ips Typographus* est notamment la proie de certains coléoptères comme le *Clerus formicarius*, l'*Epuraea Erichs*, ou le *Rhizophagus depressus* qui parcourent les galeries de Scolytes à la recherche de larve à manger. D'autre part, les Scolytes sont également menacés par les acariens.

Le *Dendroctonus Micans*, pour sa part, a un mode de fonctionnement totalement différent, la femelle et le mâle s'accouplent, dans la majorité des cas, dans une cavité dans l'arbre. Dans cette même cavité, la femelle pond ses œufs. Contrairement aux larves de l'*Ips Typographus*, elles restent dans une même cavité et l'élargissent. Malgré tout elles peuvent sortir occasionnellement pour déféquer.



Sur cette image, tirée du même article que précédemment, on peut voir un *Dendroctonus Micans* ainsi que sa galerie. On peut noter qu'il est plus grand que le *Typographe*: il mesure entre 6 à 8 mm.

Les *Melolonthinae*, plus connu sous le nom de Hannetons, menacent également les conifères. Ce sont également des coléoptères, mais cette fois nocturne et appartenant à la famille des *Scarabaeidae*. Il y a principalement deux espèces de Hannetons présent dans les Vosges, le Hanneton commun et le Hanneton forestier, *Melolontha hippocastani*. Ce dernier se distingue, comme son nom l'indique, par le fait qu'il se développe plus en forêt que le Hanneton commun. Il est également plus petit que le Hanneton commun 20 à 25 mm contre 25 à 30 mm. En 2015, suite à une pullulation de hanneton forestier, un dispositif d'observation sur 8 ans été créé afin de surveiller les populations de hannetons et l'état des cimes. Cette période de 8 ans a été choisie pour surveiller deux cycles de développement du Hanneton, deux générations.

Le Hanneton vit la majorité de sa vie, 47 mois, dans le sol contre 1 mois en vol. Il se nourrit des racines des arbres. D'autre part, il est polyphage, c'est-à-dire qu'il peut se développer sur plusieurs espèces contrairement à l'*Ips Typographus* qui a la majorité du temps l'Épicéa pour hôte. Cependant ils ont des préférences pour certains arbres comme les feuillus. Malgré tout, il n'est pas rare qu'il se développe sur les sapins. Il semblerait, d'après les observations réalisées dans le Nord de l'Alsace en 2014, que le hanneton préfère les peuplements mixtes: feuillus et résineux. Il se développe mieux dans le sable et donc dans les Vosges gréseuses du Nord.

Sur la photographie ci-dessus, issue du site internet E-phytia créé par l'INRA, on peut

voir un jeune pin sylvestre en train de mourir après avoir subi des attaques de larves de Hannetons forestier. On peut voir que ses feuilles ont jauni. Les Hannetons adultes, en revanche, n'ont aucun impact sur les conifères: en effet les adultes ne mangent pas les feuilles de conifères.



Photo d'un jeune pin sylvestre jaunissant du fait des Hannetons

Le but de l'étude qui sera menée dans les 7 prochaines années est la détermination de la cause de la pullulation des hannetons qui crée un dépérissement local des arbres. Nous avons contacté L.-M. Nageleisen, expert référent national "entomologie forestière et dépérissement", qui nous a confirmé que c'est un phénomène très local lié à la texture sableuse du sol mais il n'y a pas que la région des Vosges gréseuses qui est concernée, la forêt de Haguenau dans le Bas-Rhin ou dans les forêts parisiennes le sont aussi.

## b) Les précipitations

De manière générale, la teneur en eau des tissus végétaux peut aller jusqu'à 90% du poids. De plus, l'eau est un élément essentiel de la photosynthèse, du transport des éléments nutritifs aux parties aériennes. Le conifère est dépendant de l'eau pour sa survie. Son absence sur une longue période cause un stress qui le prédispose au dépérissement. Des dérèglements biologiques liés à des sécheresses peuvent durer jusqu'à 10 ans

Suite au constat du dépérissement des conifères en 1982, dans le cadre du programme DEFORPA, ont été réalisés des études pour connaître l'importance des précipitations dans le dépérissement.

Pour cela, Lévy et Becker, en 1987, ont comparé les courbes de croissances de différentes placettes qui sont surfaces délimitées et restreintes pour pouvoir faire un inventaire forestier. Les placettes sont organisées par groupes de deux dont l'une est saine, et l'autre très nettement dépérissant. Les couples de placettes sont proches géographiquement de manière à avoir les mêmes conditions climatiques. Elles ont également généralement la même roche mère, topographie et exposition de manière à éliminer au maximum les autres facteurs pour réaliser l'étude.

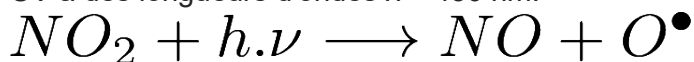
Après comparaison, entre les indices d'accroissement et la pluviométrie locale, il en résulte que les périodes où les accroissements sont faibles correspondent chacune à une période de sécheresse: 1959, 1962, 1964, 1974 et 1976. Il faut jusqu'à plusieurs années pour que les conifères commencent à croître normalement. C'est suite aux années 1959-1964, que les placettes dépérissantes au moment de l'étude, ont été fragilisées. Ce qui les a prédisposés au dépérissement.

La sécheresse de 2003, a causé le dépérissement des pins sylvestres, *Pinus sylvestris*. Les mesures dendrochronologiques, mesures des cernes de croissances des arbres, ont été menées en 2015 en Suisse sur des conifères centenaires grâce à des carottes par Lévesque, Rigling et Brang. Elles ont montré que l'Épicéa et le Mélèze ont une plus grande perte de croissance pendant les périodes de sécheresse. Le Pin noir et le Pin sylvestre ont été moins affectés durant ces mêmes périodes. Dans l'optique du réchauffement climatique, les chercheurs cités ci-avant réfléchissent à un remplacement des Épicéas largement répandu, par les Douglas plus résistant aux périodes de sécheresse.

### c) L'ozone

L'ozone ou plus particulièrement l'ozone dite troposphérique qui est située à une basse altitude dans la troposphère, partie de l'atmosphère dans laquelle nous vivons soit, entre 0 et 2 km, peut avoir des effets sur les conifères. Il ne faut pas le confondre avec la couche d'ozone qui nous protège des UV. L'ozone,  $O_3$ , est considéré comme un polluant secondaire, un polluant produit par une réaction chimique ou photochimique d'un ou plusieurs polluants primaires. L'ozone est le résultat de réactions chimiques du  $NO_2$ , polluant primaire, et du dioxygène  $O_2$ .

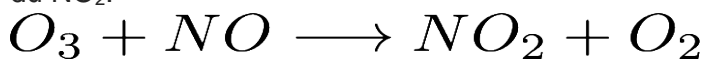
Dans un premier temps le dioxyde d'azote est dissocié à cause des rayonnements du soleil UV à des longueurs d'ondes  $\lambda < 430$  nm.



L'atome d'oxygène seul est un radical libre, il ne respecte pas la règle de l'octet, il est donc très instable. C'est pourquoi il va directement s'associer à une molécule de dioxygène et former de l'ozone :



On peut noter que par la suite l'ozone peut réagir avec le monoxyde d'azote pour redonner du  $NO_2$ :



En effet, en l'absence d'autres éléments contenant des atomes d'oxygène, le monoxyde d'azote va limiter la concentration d'ozone par cette réaction.

L'ozone a un effet sur les plantes, car la photosynthèse des plantes est perturbée. Les plantes sont plus vulnérables et sont attaquées par leurs stomates, par temps humide, les plantes absorbent davantage d'ozone. L'ozone provoque des dégâts visibles sur le feuillage des plantes, comme le jaunissement, et entraîne le ralentissement de la croissance. L'ozone est donc une menace potentielle pour les conifères y compris l'épicéa qui est considéré comme une espèce peu sensible. L'ozone peut provoquer la perte d'aiguilles.

Des expérimentations ont également été menées sur des épicéas à Montardon dans les Pyrénées. Ces Épicéas ont été exposés dès leur première année à des concentrations d' $O_3$  équivalente à celles mesurées au Col du Donon dans les Vosges dans les années 1980. Ils ont commencé à perdre leurs aiguilles prématurément à partir de la troisième année.

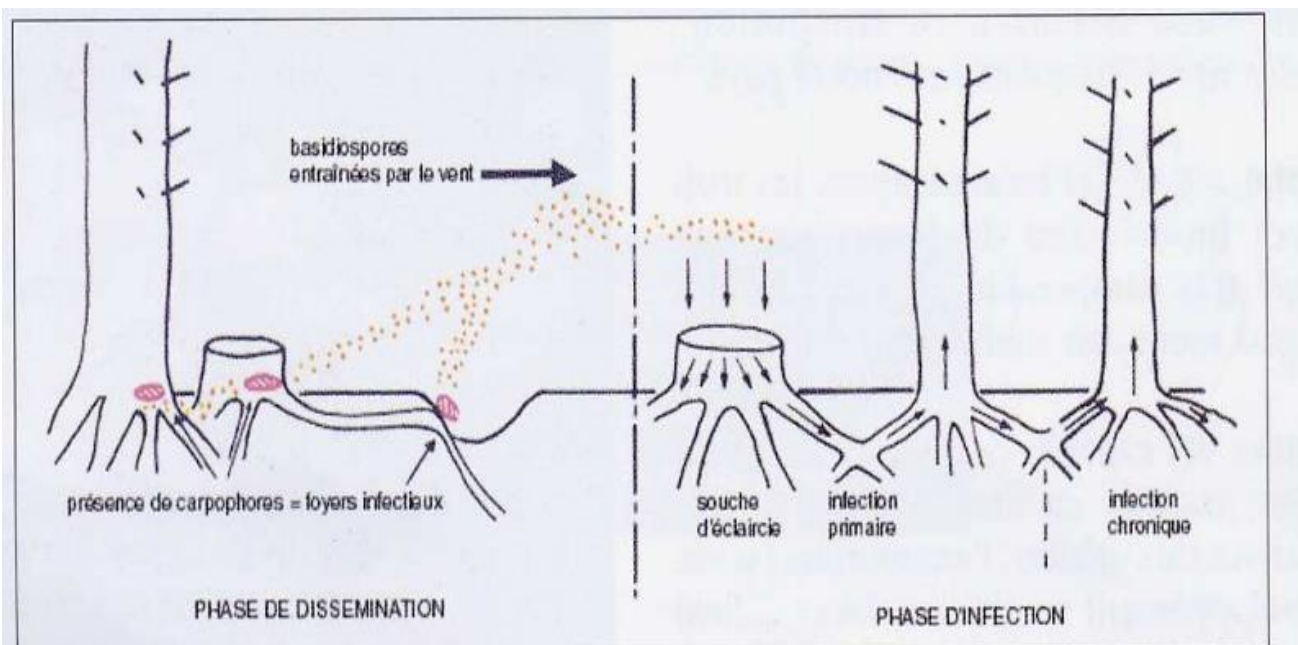


Rameau d'épicéa (*Picea abies*) après une saison d'exposition à l'ozone. Source: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

## d) Les champignons

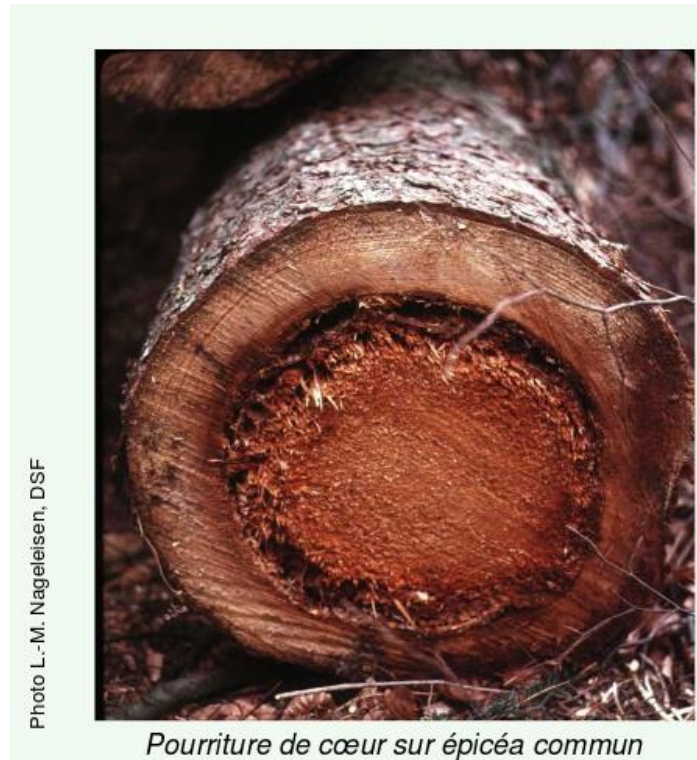
Les conifères peuvent être infectés par des champignons. Il existe différents types de champignons, les parasites du cœur, dans et sur le tronc, et les saprotrophes qui sont des décomposeurs des souches et des troncs des arbres morts. Ceux qui nous intéressent sont ceux qui s'attaquent aux arbres encore vivants. Il existe différentes espèces qui peuvent menacer les résineux comme les champignons de caries ou encore les champignons lignivores des résineux notamment les Fomes.

Le Fomes, *Heterobasidion annosum*, est un champignon qui pousse au niveau des racines et est également dangereux. En effet, il est à l'origine de pourritures du bois, surtout chez les épicéas. Une fois implanté, une contamination de l'ensemble des peuplements à lieu par contacts racinaires. Le Fomes se trouve généralement sur les conifères dans l'hémisphère Nord, de plus il fait le plus de dégât là où le sol est le plus acide et le climat le plus froid. D'où le fait que les dégâts les plus visibles sont dans les forêts résineuses exploitées tel que les Vosges, là où il y a des coupes d'arbres. En effet, le vent peut disperser sur une grande distance les spores des champignons. Les spores sont des éléments unicellulaires reproducteurs provenant des champignons, leur germination donne une forme préparatoire à la reproduction, le mycélium. Donc, les spores, une fois déposées sur un tronc d'arbres coupés, germent en donnant un mycélium qui va envahir les racines de l'arbre. Le schéma ci-dessous nous montre l'expansion des basidiospores, spores utilisées pendant la reproduction et produite par les basidiomycètes.



*Cycle infectieux et modes de propagation du fomes*

La photo suivante témoigne de l'ampleur des dégâts causés par les Fomes. La pourriture du bois peut prendre plusieurs années.



Ce sont donc les Pins sylvestre et l'épicéa qui sont les plus touchés par ce phénomène. On peut prendre aussi pour exemple le Rouge Cryptogamique des pins, également appelé *Lophodermium seditiosum*. Son hôte habituel est le pin sylvestre bien qu'il puisse également attaquer le pin noir, le cembra et le mugo qui sont rares dans les Vosges. Contrairement aux autres, ces champignons se fixent sur les aiguilles de ses hôtes. Ce parasite se développe essentiellement sur les jeunes peuplement, au cours duquel il provoque des retardements dans la croissance. Celui-ci se développe en été sur des aiguilles mortes. En effet en juillet-août, le mycélium, partie végétative des champignons, apparaît grâce à une germination des spores, puis envahissent les aiguilles, comme on peut le voir sur la photographie ci-après. Une fois les aiguilles infectées, des taches jaunâtres apparaissent petit à petit en automne puis deviennent brunes en hivers. L'année suivante, les aiguilles les plus atteintes par les champignons tombent et les moins touchés sèchent sur les conifères. Certaines conditions favorisent la propagation cette infection notamment météorologique avec une forte pluviosité en 2 à 3 années de suite qui entraîne l'humidité ainsi que des peuplements serrés entre eux. Néanmoins, les dégâts sont plus légers lorsque l'arbre a atteint ses 10 ans.



Photo représentant la fructification de Lophodermium sur aiguilles de pin sylvestre

Nom commun	Espèce	Localisation	Hôtes principaux	Type de pourriture
<b>Pézize renflée</b>	<i>Rhizina undulata</i>	base du tronc	pins, épicéas	pourridié racinaire
<b>Phéole de Schweinitz</b>	<i>Phaeolus schweinitzii</i>	base du tronc	épicéas, douglas	cubique brun-rouge
<b>Sparassis crépu</b>	<i>Sparassis crispa</i>	base du tronc, racines	pins	cubique brun-rouge (cœur)
<b>Tramète des pins</b>	<i>Phellinus pini</i>	tronc, branches	pins, sapins	blanche (cœur)
<b>Polypore marginé</b>	<i>Fomitopsis pinicola</i>	tronc, branches	sapins, pins, épicéas, autres résineux	cubique brun-rouge (cœur)
<b>Stérée sanguinolente</b>	<i>Stereum sanguinolentum</i>	tronc, branches	épicéas, sapins, autres résineux	échauffure blanche (cœur et aubier)
<b>Phellin de Hartig</b>	<i>Phellinus hartigii</i>	tronc, branches	sapins	blanche
<b>Calocère visqueuse</b>	<i>Calocera viscosa</i>	base du tronc	pins, épicéas, douglas	cubique brun-rouge (cœur)

Tableau représentant les caractéristiques de certains Champignons lignivores des résineux

Le tableau ci-dessus liste les différents champignons lignivores des résineux autres que le Fomes. Ces champignons sont moins répandus mais peuvent tout de même concerner les conifères vosgiens. Il existe également d'autres champignons qui affectent les aiguilles, cette fois-ci, telle que le *Rhizosphaera kalkhoffii*. Ce dernier cause le brunissement et des chutes d'aiguilles. Son développement est favorisé lors des périodes de fortes chaleurs.

Pour conclure, les champignons ont des effets locaux mais représentent pour les forestiers des pertes financières considérables. Les champignons peuvent avoir des effets dévastateurs notamment lorsque l'arbre est déjà fragilisé par des déficits hydriques.



# Conclusion

Lors de nos recherches, nous avons pu constater que les forêts vosgiennes disposent d'un sol qui peut être défavorable à la sylviculture et à la bonne santé des conifères. Nous avons pu confirmer cela par des expériences sur le terrain et interviews.

Cela a participé au déclenchement du dépérissement des conifères des années 1980 avec les sécheresses rapprochées des années 1970. Les différentes personnes que nous avons interrogées, nous ont bien confirmé que la crise de 1980 est bien terminée du fait des mesures prises pour limiter les émissions de NO<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>.

Les dépérissements locaux qui ont eu lieu depuis dans les Vosges chez les conifères ne sont plus dûs aux pluies acides. Ils sont dus à un mélange de différents facteurs, développés dans la dernière partie, notamment aux carences en nutriments obtenus par les racines, à des difficultés d'alimentations en eau, au sol. Dans une moindre mesure les Scolytes, et les Hanneçons sont également déclencheur de dépérissements, mais ce sont des phénomènes très localisés. Les Champignons parasites le sont eux aussi. La grande concentration de l'Ozone est très périodique et semble aujourd'hui avoir peu d'impact sur les forêts vosgiennes.

De manière générale, nous avons pu remarquer que le réchauffement climatique sera un facteur important des dépérissements futurs de la forêt vosgienne : les sécheresses favorisant l'implantation et la reproduction des Scolytes ainsi que l'implantation de certains Champignons et la production d'Ozone est favorisé par le réchauffement. Les Épicéas et sapins devront peut-être céder leur place à d'autres essences d'arbres supportant mieux les sécheresses.

# Médiagraphie

## I) Le dépérissement chez les conifères

### a. Historique

- Cemagref n'est plus... bienvenue à l'IRSTEA. In Forêt Méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne* [en ligne]. Forêt Méditerranéenne, 6 janvier 2012, [consulté le 17 novembre 2016] Disponible sur: <http://www.foret-mediterraneenne.org/fr/actualites/id-9-le-cemagref-n-est-plus-bienvenue-a-l-irstea>
- La forêt vosgienne. In Académie de Rouen. *Académie de Rouen* [en ligne]. Académie de Rouen, sans date, [consulté le 2016]. Disponible sur : <http://ecoles.ac-rouen.fr/saint-ouen/anciensite/vosgesiste%20foret/La%20foret%20vosgienne.htm>
- Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises. In Researchgate. *Researchgate* [en ligne]. Researchgate, août 2006, [consulté le 27 octobre 2016]. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/27601882\\_Secheresse\\_et\\_canicule\\_de\\_l%27ete\\_2003\\_quelles\\_consequences\\_pour\\_les\\_forets\\_francaises](https://www.researchgate.net/publication/27601882_Secheresse_et_canicule_de_l%27ete_2003_quelles_consequences_pour_les_forets_francaises)
- KOERNER WALTRAND, TABEAUD MARTINE. L'histoire de l'occupation du sol et le dépérissement dans les forêts vosgiennes. *Annales de Géographie*, t. 102, n°572, 1993. pp. 412-414.
- LANDMANN, Guy, BONNEAU, M. Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans les montagnes françaises au cours des années 1980. ENGREF, Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Nancy (FRA), 1994, [consulté le 26 novembre 2016]. Disponible sur : <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/26580>
- BECKER, M. Le dépérissement du Sapin dans les vosges. Quelques facteurs liés à la détérioration des cimes. ENGREF, Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Nancy (FRA), 1985, [consulté le 26 novembre 2016]. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/21809>
- LANDMANN, Guy. La santé des forêts françaises : bilan de l'année 1998 et nouveaux acquis. In ResearchGate, *ResearchGate* [en ligne]. Revue Forestière Française, janvier 2000 [consulté le 17 novembre 2016]. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/265291579\\_La\\_Sante\\_des\\_forets\\_francaises\\_bilan\\_de\\_l%27annee\\_1998\\_et\\_nouveaux\\_acquis](https://www.researchgate.net/publication/265291579_La_Sante_des_forets_francaises_bilan_de_l%27annee_1998_et_nouveaux_acquis)
- BONNEAU, M. Dépérissement des forêts : où en est-on ? In INRA. *INRA* [en ligne]. INRA, janvier 1988 [consulté le 27 novembre 2016]. Disponible sur: <http://www7.inra.fr/dpenv/bonnec03.htm#haut>

- LANDMANN, G. La santé des forêts françaises : bilan de l'année 1999 et nouveaux acquis. In ResearchGate, *ResearchGate* [en ligne]. Revue Forestière Française, janvier 2000 [consulté le 10 novembre 2016]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/265291579\\_La\\_Sante\\_des\\_forets\\_francaises\\_bilan\\_de\\_l%27annee\\_1998\\_et\\_nouveaux\\_acquis](https://www.researchgate.net/publication/265291579_La_Sante_des_forets_francaises_bilan_de_l%27annee_1998_et_nouveaux_acquis)
- QUIRET, Mathieu. Les forêts toujours hantées par les pluies acides. *Les Echos* [en ligne], 20 décembre 2005 [consulté le 1 décembre 2016]. Disponible sur: [http://www.lesechos.fr/20/12/2005/LesEchos/19565-051-ECH\\_les-forets-toujours-hantees-par-les-pluies-acides.htm](http://www.lesechos.fr/20/12/2005/LesEchos/19565-051-ECH_les-forets-toujours-hantees-par-les-pluies-acides.htm)

## b. Etat des lieux dans les Vosges

- Conifère. In *Le Petit Larousse illustré*. Edition anniversaire de la Semeuse 1890-2010. Larousse, 2009. pp. 236. ISBN 978-2-03-584078-3
- Massif des Vosges. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 19 novembre 2003, 29 septembre 2016 [consulté le 12 octobre 2016]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Massif\\_des\\_Vosges](https://fr.wikipedia.org/wiki/Massif_des_Vosges)
- Le taux de saturation des sols de France. In Gis Sol. *Gis Sol* [en ligne]. Gis Sol, 2010, 2016, [consulté le 24 novembre 2016]. Disponible sur: <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/le-taux-de-saturation-des-sols-de-france-2327>
- La GRECO D : Vosges et ses SER. In IGN. *Inventaire forestier* [en ligne]. IGN, 2012, [consulté le 3 décembre 2016]. Disponible sur : <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article780>
- Atmosphère et Forêt. *Report'air Dossier* [en ligne], 2010, n°20 [consulté le 26 novembre 2016]. Disponible sur: [http://www.atmo-alsace.net/medias/produits/Atmosphere\\_et\\_Foret.pdf](http://www.atmo-alsace.net/medias/produits/Atmosphere_et_Foret.pdf)
- Vosges du Nord. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 26 juillet 2005, 29 septembre 2016 [consulté le 12 octobre 2016]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Vosges\\_du\\_Nord](https://fr.wikipedia.org/wiki/Vosges_du_Nord)
- L'épicéa commun (*Picea abies*) In Viagallica. *Viagallica* [en ligne]. Viagallica, non donnée, [consulté le 10 novembre 2016]. Disponible sur : [http://viagallica.com/v/epicea\\_commun.htm](http://viagallica.com/v/epicea_commun.htm)
- PÖTZL, Norbert F. Nadeln fallen grad so raus. *Der Spiegel* [en ligne], 17 décembre 1984 [consulté le 30 novembre 2016]. Disponible sur : <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13511918.html>
- BECKER, M., GEREMIA, F., SCHIPFER, R. Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique et dendrochronologique. *Archives ouvertes HAL* [en ligne]. INRA/EDP, 1987 [consulté

le 4 janvier 2017]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882424>

## II) Les effets des pluies acides sur les conifères

- CHABOT, Claude. Effets des pluies acides sur les écosystèmes forestiers - impact sur les peuplements d'Épinettes au Québec. Université de Sherbrooke Faculté des sciences appliquées, 1981. 132p.

### **a. Le phénomène des pluies acides**

- Quels sont les principaux polluants de l'air ? In Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. *Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer* [en ligne]. Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 11 décembre 2015 [consulté le 15 septembre 2016]. Disponible sur : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Quels-sont-les-principaux,45342.html>
- MAGDELAINE, Christophe. Les pluies acides : définition et conséquences In notre-planete.info. *notre-planete.info* [en ligne]. notre-planete.info, 22 février 2016 [consulté le 15 septembre 2016]. Disponible sur : [http://www.notre-planete.info/environnement/pollution\\_air/pluies\\_acides.php](http://www.notre-planete.info/environnement/pollution_air/pluies_acides.php)
- Les pluies acides, c'est quoi ? In Lig'Air. *Lig'Air* [en ligne]. Lig'Air, sans date, [consulté le 5 octobre 2016]. Disponible sur : <https://www.ligair.fr/faq/les-pluies-acides-c-est-quoi>
- Pluies acides et dépérissement forestier. In CANOPÉ académie d'Amiens. *CANOPÉ académie d'Amiens* [en ligne]. CANOPÉ académie d'Amiens, sans date, [consulté le 24 novembre 2016]. Disponible sur : [http://crdp.ac-amiens.fr/enviro/site\\_FLASH/air/air\\_maj6\\_detail\\_p2.htm](http://crdp.ac-amiens.fr/enviro/site_FLASH/air/air_maj6_detail_p2.htm)
- LANDMANN, G. Les pluies acides. Un holocauste écologiste? *La Recherche* [en ligne], janvier 2002, n°351, 15 septembre 2014 [consulté le 10 novembre 2016]. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/265641746\\_Les\\_pluies\\_acides\\_Un\\_holocauste\\_ecologiste](https://www.researchgate.net/publication/265641746_Les_pluies_acides_Un_holocauste_ecologiste)
- Exceedance of critical loads of acidity. In European Environment Agency. *European Environment Agency* [en ligne]. European Environment Agency, 8 décembre 2010, 29 novembre 2012 [consulté le 2 décembre 2016]. Disponible sur : <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/exceedance-of-critical-loads-of-acidity>
- BOUVAREL, P. Le dépérissement des forêts attribué aux dépôts atmosphériques acides. *Revue Forestière Française*, 1984, n° 36, pp. 173-180.

- MICHAUT, Cécile. Les acides et les bases. *La Recherche*, juin 2008, 420, pp.75-78. ISSN: 0029-567
- Monts de la Jizera. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 4 février 2011, 1 novembre 2016 [consulté le 18 décembre 2016]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Monts\\_de\\_la\\_Jizera](https://fr.wikipedia.org/wiki/Monts_de_la_Jizera)
- Black Triangle (region). In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 16 avril 2014, 3 novembre 2016 [consulté le 18 décembre 2016]. Disponible sur : [https://en.wikipedia.org/wiki/Black\\_Triangle\\_\(region\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Black_Triangle_(region))
- pH. In CNRS. *CNRS* [en ligne]. CNRS, septembre 2005 [consulté le 18 décembre 2016]. Disponible sur : <http://www.cnrs.fr/cnrs-images/chimieaulyce/THEMES/acidite/ph.htm>

## b. Conséquences sur les conifères

- ARNOULD, P., DA LAGE, A. Forêts sous la pluie acide des mots. *Mots*, n°39, juin 1994. Environnements, Écologie, Verts. In Persée, *Persée*, 2016 [consulté le 10 novembre 2016]. pp.6-20. Disponible sur : [http://www.persee.fr/doc/mots\\_0243-6450\\_1994\\_num\\_39\\_1\\_1883](http://www.persee.fr/doc/mots_0243-6450_1994_num_39_1_1883)
- NYS, C. Fertilisation, dépérissement et production de l'épicéa commun (*picea abies*) dans les ardennes. *Revue Forestière Française*, 1989, n° 61, pp. 336-347.
- BECKER, M. Le dépérissement du sapin dans les vosges quelques facteurs liés à la détérioration des cimes. *Revue Forestière Française*, 1985, n° 37, pp. 281-287
- *Dépérissement des forêts*. In Vedula. *Vedula* [en ligne], Vedula, 2016, [consulté le 17 novembre 2016]. Disponible sur : <http://www.vedura.fr/environnement/biodiversite/deperissement-forets>
- BONNEAU, M., FRICKER, C. Le dépérissement des forêts dans le massif vosgien: relations possibles avec la pollution atmosphérique. *Revue Forestière Française*, 1985, n° 37, pp. 105-126.
- BONNEAU, M. Que sait-on maintenant des causes du « dépérissement » des forêts ? *Revue Forestière Française*, 1989, n° 61, pp. 367-386.
- Nécrose. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 4 octobre 2004, 10 décembre 2016 [consulté le 30 décembre 2016]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nécrose>
- Sénescence. In Futura Science. *Futura Santé* [en ligne]. MadeInFutura, 13 octobre 2010, [consulté le 30 décembre 2016]. Disponible sur : <http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-senescence-6791/>
- Trichome. In Futura Science. *Futura Planète* [en ligne]. MadeInFutura, 24 avril 2013, [consulté le 30 décembre 2016]. Disponible sur : <http://www.futura->

[sciences.com/planete/definitions/botanique-trichome-13330/](http://sciences.com/planete/definitions/botanique-trichome-13330/)

- Les parois végétales. In Cours Pharmacie. *Cours Pharmacie* [en ligne]. Cours Pharmacie, 31 août 2009, [consulté le 30 décembre 2016]. Disponible sur : <http://www.cours-pharmacie.com/biologie-vegetale/les-parois-vegetales.html>
- Mésophylle. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 29 juillet 2015 [consulté le 30 décembre 2016]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mésophylle>
- Stomatique. In AquaPortail. *AquaPortail* [en ligne]. AquaPortail, 19 décembre 2016, [consulté le 1 janvier 2017]. Disponible sur : <https://www.aquaportail.com/definition-205-stomatique.html>
- Réniforme. In AquaPortail. *AquaPortail* [en ligne]. AquaPortail, 25 août 2008, 29 décembre 2015 [consulté le 1 janvier 2017]. Disponible sur : <https://www.aquaportail.com/definition-8016-reniforme.html>
- Excréter. In Linternaute. *Linternaute* [en ligne]. CCM Benchmark Group, 29 mai 2015 [consulté le 1 janvier 2017]. Disponible sur : <http://www.linternaute.com/dictionnaire/fr/definition/excreter/>
- BADOT P.-M., GARRE J.-P. Perturbation hydrique et altération des surfaces dans les aiguilles d'épicéas (*Picea abies* L) du Jura en fonction de leur âge et de l'état de dépérissement des arbres. Etude écologique et dendrochronologique. *Archives ouvertes HAL* [en ligne]. INRA/EDP, 1990 [consulté le 4 janvier 2017]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882727/document>

### c. Effet sur l'environnement

- Le GALL, Anne Christine. Effets des dépôts atmosphériques de soufre et d'azote sur les sols et les eaux douces en France. In Institut national de l'environnement industriel et des risques. *INERIS* [en ligne] INERIS, 22 novembre 2004 [consulté le 26 décembre 2016]. Disponible sur: [http://www.ineris.fr/centredoc/drc\\_45928.pdf](http://www.ineris.fr/centredoc/drc_45928.pdf)
- LANDMANN, Guy. Dépérissement des forêts, acidification des sols et suivi des écosystèmes forestiers : leçons et héritages des années 1980/1990. In Académie d'Agriculture de France, *Académie d'Agriculture de France* [en ligne] Académie d'Agriculture de France, le 3 décembre 2014 [consulté le 26 novembre 2016]. Disponible sur : [http://www.academie-agriculture.fr/system/files\\_force/seances-colloques/20141203presentation2.pdf?download=1](http://www.academie-agriculture.fr/system/files_force/seances-colloques/20141203presentation2.pdf?download=1)
- VAN DER HEIJDEN, Grégory. Le dépérissement des forêts dans le massif vosgien. In INRA. *INRA* [en ligne]. INRA, 9 octobre 2013, 4 mai 2016 [consulté le 26 novembre 2016]. Disponible sur :

<https://www6.nancy.inra.fr/bef/Vulgarisation/Acidification-dans-les-Vosges/Consequences/Deperissement>

- LANDMANN, G., BONNEAU, M., ADRIAN, M. Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans le massif vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements? In ResearchGate, *ResearchGate* [en ligne]. Revue Forestière Française, 1987, [consulté le 10 novembre 2016]. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/27618629\\_Le\\_deperissement\\_du\\_Sapin\\_pectine\\_et\\_de\\_l'Epicea\\_commun\\_dans\\_le\\_massif\\_vosgien\\_est-il\\_en\\_relation\\_avec\\_l'etat\\_nutritionnel\\_des\\_peuplements](https://www.researchgate.net/publication/27618629_Le_deperissement_du_Sapin_pectine_et_de_l'Epicea_commun_dans_le_massif_vosgien_est-il_en_relation_avec_l'etat_nutritionnel_des_peuplements)
- Le taux de saturation des sols de France. In INRA. *Gis Sol* [en ligne]. Gis Sol, 2010, non trouvé [consulté le 24 novembre 2016]. Disponible sur: <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/le-taux-de-saturation-des-sols-de-france-2327>
- Forêt domaniale d'Abreschviller (Moselle) - SP 57 In Office National Des Forêts. *Office National Des Forêts* [en ligne]. Office National Des Forêts, 2003 [consulté le 24 novembre 2016]. Disponible sur : <http://www.onf.fr/renecofor/sommaire/sites/lorraine/20090211-110558-263368/@@index.html>
- Fonctionnement et bilan hydro-biogéochimique du petit bassin versant forestier de Strengbach (Hautes-Vosges, France). In *Annales de Géographie*, t. 104, n°581-582, 1995. pp. 178-182.
- Définitions. In INRA. *INRA* [en ligne]. INRA, 2001 [consulté le 11 janvier 2017]. Disponible sur: <https://www2.nancy.inra.fr/collectif/acidification/Definitions/definitions.html#TS>
- La fertilité chimique d'un sol. In Université Nice Sophia Antipolis. *La dégradation des sols dans le monde* [en ligne]. Université Nice Sophia Antipolis, 2008 [consulté le 11 janvier 2017]. Disponible sur: <http://unt.unice.fr/uoh/degisol/fertilite-chimique.php>
- OUIMET R., MOORE, J-D, DUCHESNE, L. Évolution du statut nutritif des sapinières à la Forêt Montmorency entre 1967 et 2011. *Le naturaliste canadien*, 2015, n° 139, pp. 35-41.
- Évolution constatée des sols forestiers au cours des dernières décennies. *I-Revues*. *I-Revues* [en ligne]. ENGREF, 2000 [consulté le 21 janvier 2017]. Disponible sur: <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/5406>
- Nitrification. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 17 juillet 2005, 1 novembre 2016 [consulté le 16 janvier 2017]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nitrification>
- Nitrobacter. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 3 avril 2012, 27 août 2016 [consulté le 16 février 2017]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nitrobacter>

- Nitrobacter. In Wikipédia, l'encyclopédie libre [en ligne]. Fondation Wikimedia, 25 janvier 2012, 20 février 2015 [consulté le 16 février 2017]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nitrosomonas>
- Nitrifying bacteria. In Wikipédia, l'encyclopédie libre [en ligne]. Fondation Wikimedia, 25 septembre 2006, 16 décembre 2016 [consulté le 16 février 2017]. Disponible sur : [https://en.wikipedia.org/wiki/Nitrifying\\_bacteria](https://en.wikipedia.org/wiki/Nitrifying_bacteria)

### III) Impact des autres facteurs à l'origine du dépérissement

#### a. Parasites

- Rhizosphère. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 4 octobre 2006, 17 août 2016, [consulté le 3 novembre 2016]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Rhizosph%C3%A8re#Bibliographie>
- Bostryche typographe. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 17 août 2003, 12 décembre 2016 [consulté le 18 décembre 2016]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Bostryche\\_typographe](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bostryche_typographe)
- Coleoptera. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 23 novembre 2016, 13 mai 2003 [consulté le 18 décembre 2016]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Coleoptera>
- LÉVIEUX, J., LIEUTIER, F., DELPLANQUE, A. Les scolytes ravageurs de L'Épicéa. *Revue Forestière Française*, 1985, n° 37, pp. 347-358.
- H.J. Eloyes: Le fléau des scolytes ravage les forêts. l'ancien forestier bernard pierre a dû couper ses Épicéas. In *Vosges Matin* [en ligne]. Vosges Matin, 7 septembre 2015 [consulté le 22 décembre 2016]. Disponible sur: <http://www.vosgesmatin.fr/edition-d-epinal/2015/09/07/eloyes-le-fleau-des-scolytes-ravage-les-forets-l-ancien-forestier-bernard-pierre-a-du-couper-ses-epiceas>
- VIIRI, Heli, LIEUTIER, François. Ophiostomatoid fungi associated with the spruce bark beetle, Ips typographus, in three areas in France. *Annals of Forest Science*, Springer Verlag/EDP Sciences, 2004, n°61, pp.215-219.
- Département de la Santé des Forêts. Le hanneton forestier. In INRA. *Ephytia* [en ligne]. INRA, 7 juillet 2015 [consulté le 22 décembre 2016]. Disponible sur: <http://ephytia.inra.fr/fr/C/20318/Forets-Hanneton-forestier>
- NAGELEISEN, L.M. Les hannetons en forêt. In DÉPARTEMENT DE LA SANTÉ DES FORÊTS. Forestiers d'Alsace. Département de la Santé des Forêts, septembre 2010



[consulté le 22 décembre 2016]. Disponible sur:

[http://www.forestiersdalsace.fr/UserFiles/File/PDF/Exemples/hanneton\\_DSDF\\_2013.pdf](http://www.forestiersdalsace.fr/UserFiles/File/PDF/Exemples/hanneton_DSDF_2013.pdf)

- NAGELEISEN, Louis-Michel, BÉLOUARD, Thierry, MEYER, Joseph. Le hanneton forestier (*Melolontha hippocastani* Fabricius 1801) en phase épidémique dans le nord de l'Alsace. *Revue Forestière Française*, 2015, n° 67, pp. 353-366.
- NAGELEISEN, Louis-Michel, MEYER, Joseph. Hannetons: essaimage massif dans l'Est de la France en mai 2015. In DÉPARTEMENT DE LA SANTÉ DES FORÊTS. Département de la Santé des Forêts. Département de la Santé des Forêts, juillet 2015 [consulté le 22 décembre 2016]. Disponible sur: [http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/hanneton\\_actu.pdf](http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/hanneton_actu.pdf)
- Scolytinae. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 1 octobre 2003, 3 novembre 2016 [consulté le 21 décembre 2016]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Scolytinae>
- HUBAULT, E. Invasions d'insectes xylophages dans les peuplements résineux des Vosges alsaciennes. In *I-Revues. I-Revues* [en ligne]. ENEF, Ecole nationale des eaux et forêts, Nancy (FRA), 1923, 1923 [consulté le 22 décembre 2016]. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/33002>

## b. Les précipitations

- Le dépérissement du sapin dans les Vosges: rôle primordial de déficits d'alimentation en eau. In *CCSD Archives ouvertes HAL* [en ligne]. INRA/EDP, 1987 [consulté le 26 novembre 2016]. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882425>
- LÉVESQUE, M., BRANG, P., RIGLING, A. Réponse à la sécheresse de conifères indigènes et exotiques: une étude dendroécologique. In *ResearchGate, ResearchGate* [en ligne]. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, juin 2015 [consulté le 24 décembre 2016]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/283829188\\_Reponse\\_a\\_la\\_secheresse\\_de\\_coniferes\\_indigenes\\_et\\_exotiques\\_une\\_etude\\_dendroecologique?enrichId=rgreq-35c15f9cdc31bba109bf05adad279568-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4MzgyOTE4ODtBUzozNDMxMDgzMTYzNTI1MTJAMTQ1ODgxNDgwNTA2MQ%3D%3D&el=1\\_x\\_3&esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/283829188_Reponse_a_la_secheresse_de_coniferes_indigenes_et_exotiques_une_etude_dendroecologique?enrichId=rgreq-35c15f9cdc31bba109bf05adad279568-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4MzgyOTE4ODtBUzozNDMxMDgzMTYzNTI1MTJAMTQ1ODgxNDgwNTA2MQ%3D%3D&el=1_x_3&esc=publicationCoverPdf)
- LADET, Nicole. Forêts en 2015 : un stress hydrique important. In INRA, INRA [en ligne]. INRA, 28 août 2015 [consulté le 23 décembre 2016]. Disponible sur: <http://www.inra.fr/Grand-public/Ressources-et-milieus-naturels/Toutes-les->

### c. L'ozone

- Pollution photochimique. In CITEPA. *CITEPA* [en ligne]. CITEPA, 1 décembre 2016 [consulté le 5 janvier 2017]. Disponible sur: <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/phenomenes/pollution-photochimique>
- Ozone troposphérique. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 19 septembre 2005, 2 janvier 2017 [consulté le 19 janvier 2017]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ozone\\_troposph%C3%A9rique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ozone_troposph%C3%A9rique)
- Polluant secondaire. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 29 octobre 2006, 23 janvier 2014 [consulté le 19 janvier 2017]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Polluant\\_secondaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polluant_secondaire)
- Polluant primaire. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 18 novembre 2010, 31 juillet 2015 [consulté le 19 janvier 2017]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Polluant\\_primaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polluant_primaire)
- Les pollutions secondaires dues au dioxyde d'azote. In Projet Conception et Étude de Sites Internets pour la Formation Scientifique. *Projet C.E.S.I.F.S.* [en ligne]. MINES Saint Etienne, sans date [consulté le 19 janvier 2017]. Disponible sur : <http://cesifs.emse.fr/BULLES/BELLECOMBE/BULLES-3/Ecologie/Pages/ozone.html>

### d. Les champignons

- Les champignons de caries. In Société Internationale d'arboriculture Quebec Inc. SIAQ [en ligne]. SIAQ, sans date [consulté le 4 janvier 2017]. Disponible sur: [https://www.siaq.org/\\_conference/champignon-carie.pdf](https://www.siaq.org/_conference/champignon-carie.pdf)
- Champignons pathogènes. In Société Mycologique des Hautes-Vosges. *SMHV* [en ligne]. SMHV, sans date [consulté le 4 janvier 2017]. Disponible sur: [http://www.smhv.net/champignons\\_pathogenes.ws](http://www.smhv.net/champignons_pathogenes.ws)
- Les champignons. In Société Mycologique des Hautes-Vosges. *SMHV* [en ligne]. SMHV, 2010 [consulté le 4 janvier 2017]. Disponible sur: [http://gfol1.smhv.net/download/les\\_champignons\\_pathogenes\\_ws4504223.pdf](http://gfol1.smhv.net/download/les_champignons_pathogenes_ws4504223.pdf)
- Département de la Santé des Forêts. *Rhizosphaera* sp. In INRA. *Ephytia* [en ligne]. INRA, 3 janvier 2017 [consulté le 4 janvier 2017]. Disponible sur: <http://ephytia.inra.fr/fr/C/18700/Forets-Rhizosphaera-sp-des-resineux>
- Saprophyte. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 6 décembre 2003, 20 janvier 2017 [consulté le 22 janvier 2017]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Saprophyte>
- Polypore du pin. In *Wikipédia, l'encyclopédie libre* [en ligne]. Fondation Wikimedia, 2 septembre 2007, 16 octobre 2016 [consulté le 22 janvier 2017]. Disponible sur :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Polypore\\_du\\_pin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polypore_du_pin)

- Ministère de l'Agriculture, Administration des Eaux et Forêts. La pourriture alvéolaire du bois des pins - le polypore du pin. ENEF, Ecole nationale des eaux et forêts, Nancy (FRA), 1941 [consulté le 22 janvier 2017]. Disponible sur: <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/33527>
- Département de la santé des forêts. Le Fomes des résineux. Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt, juillet 2013 [consulté le 22 janvier 2017]. Disponible sur: [http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/Plaqueette\\_Fomes\\_2013-1\\_cle0d148e.pdf](http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/Plaqueette_Fomes_2013-1_cle0d148e.pdf)
- Département de la Santé des Forêts. Champignons lignivores des résineux. In INRA. *Ephytia* [en ligne]. INRA, 11 octobre 2015 [consulté le 22 janvier 2017]. Disponible sur: <http://ephytia.inra.fr/fr/C/18711/Forets-Champignons-lignivores-des-resineux>

# Sources des illustrations

- **Cartes pages 5, 6, schéma page 35 et graphique page 36:** Guy Landmann, Ecofor [http://www.academie-agriculture.fr/system/files\\_force/seances-colloques/20141203presentation2.pdf](http://www.academie-agriculture.fr/system/files_force/seances-colloques/20141203presentation2.pdf)
- **Carte page 8:** Inventaire forestier (INF) Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) [http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/GRECO\\_D.pdf](http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/GRECO_D.pdf)
- **Cartes pages 11, 12, 14 et graphique page 13:** Inventaire forestier (INF) Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) [http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/Tome\\_D.pdf](http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/Tome_D.pdf)
- **Illustration page 9:** Der Spiegel <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13511918.html>
- **Carte page 16:** OpenStreetMap <https://www.openstreetmap.org/>
- **Schéma page 21:** Futura Planète <http://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/botanique-tout-savoir-coniferes-774/page/9/>
- **Photographie page 22:** notre-planete.info [https://www.notre-planete.info/environnement/pollution\\_air/pluies\\_acides.php](https://www.notre-planete.info/environnement/pollution_air/pluies_acides.php)
- **Carte comparative page 23:** Wikipédia [https://fr.wikipedia.org/wiki/Acidification\\_des\\_sols](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acidification_des_sols)
- **Schéma page 24:** Fédération canadienne de la faune <http://cwf-fcf.org/fr/fcf/communiquez-avec-nous/glossaire/gardening/Stomate.html>
- **Graphique page 26:** Abrahamsen G. <http://www.chabotpomerleauass.com/pdf/effets-pluies-acides-sur-ecosystemes-forestiers.pdf>
- **Photographie page 27:** Astronoo <http://www.astronoo.com/es/articulos/lluvia-acida.html>
- **Schéma page 27:** Tilquin F. et Jourdan E. <http://slideplayer.fr/slide/1156002/>
- Photog
- **Graphique page 30:** Knabe W. <http://www.chabotpomerleauass.com/pdf/effets-pluies-acides-sur-ecosystemes-forestiers.pdf>
- **Schémas pages 34 et 37:** Le Gall Anne Christine, Ineris [http://www.ineris.fr/centredoc/drc\\_45928.pdf](http://www.ineris.fr/centredoc/drc_45928.pdf)
- **Schémas pages 39 et 42:** Léviex J., Lieutier F., Delplanque A., Revue Forestière Française. [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/21822/RFF\\_1985\\_5\\_347.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/21822/RFF_1985_5_347.pdf?sequence=1)
- **Photographie page 40:** Wikipédia [https://fr.wikipedia.org/wiki/Bostryche\\_typographe](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bostryche_typographe)
- **Photographie page 41:** Vosges matin <http://www.vosgesmatin.fr/edition-d-epinal/2015/09/07/eloyes-le-fleau-des-scolytes-ravage-les-forets-l-ancien-forestier-bernard-pierre-a-du-couper-ses-epiceas>
- **Photographie page 43:** Département de la Santé des Forêts, E-Phytia <http://ephytia.inra.fr/fr/C/20318/Forets-Hanneton-forestier>

- **Photographie page 45:** Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL  
[http://www.wsl.ch/forest/wus/diag/show\\_singlerecord.php?TEXTID=119&MOD=1&LANGID=2](http://www.wsl.ch/forest/wus/diag/show_singlerecord.php?TEXTID=119&MOD=1&LANGID=2)
- **Schéma page 46 et photographie page 47:** Département de la Santé des Forêts, Ministre de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt  
[http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/Plaqueette\\_Fomes\\_2013-1\\_cle0d148e.pdf](http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/Plaqueette_Fomes_2013-1_cle0d148e.pdf)
- **Tableau page 48:** Département de la Santé des Forêts, E-Phytia  
<http://ephytia.inra.fr/fr/C/18711/Forets-Champignons-lignivores-des-resineux>
- **Photo page 48:** Département de la Santé des Forêts, E-Phytia  
<http://ephytia.inra.fr/fr/C/19092/Forets-Rouge-cryptogamique-des-aiguilles-de-pin>