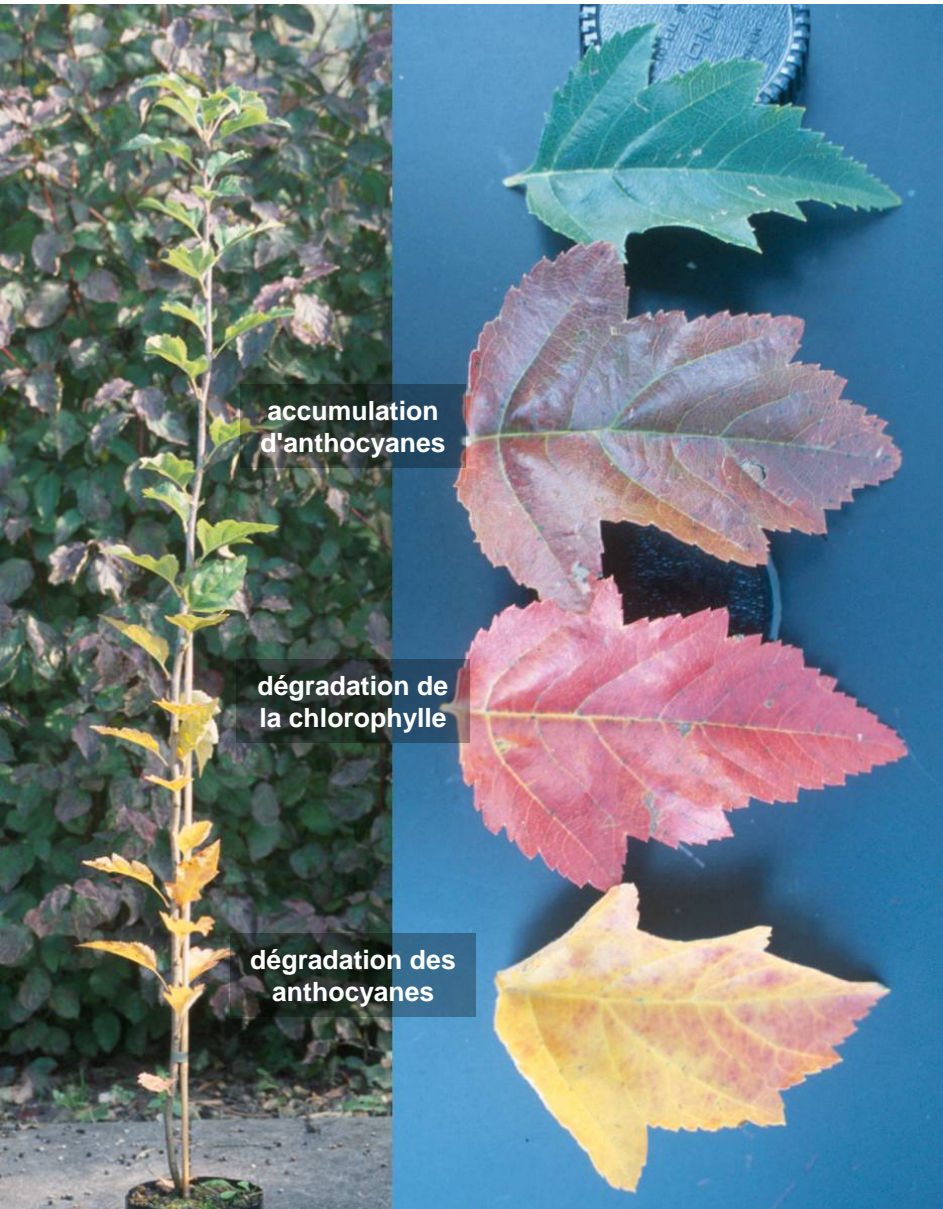


6.2 Phases de décoloration pendant la sénescence automnale

chez *Sorbus torminalis*...



... et chez *Acer saccharum*

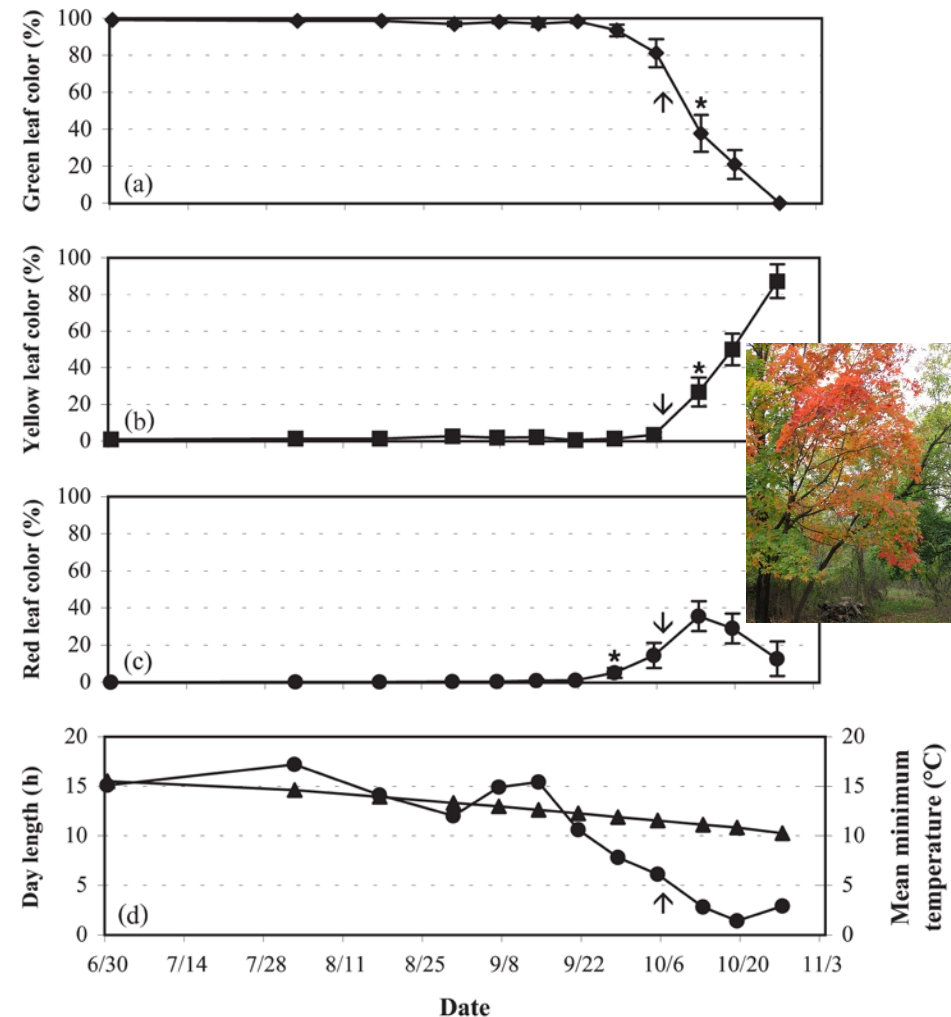
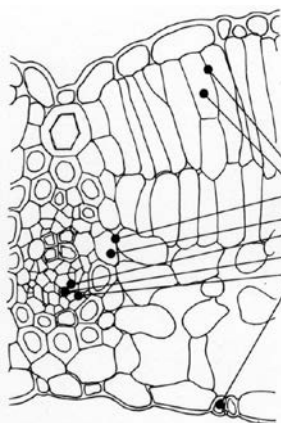


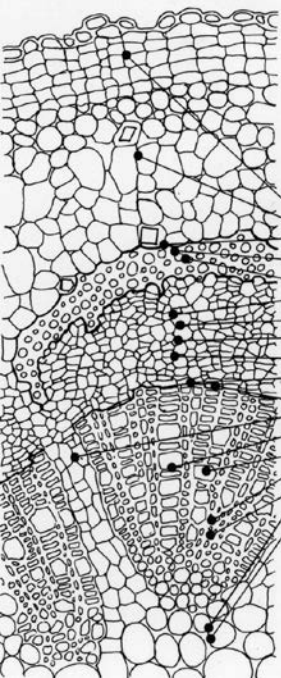
Figure 1. Stand means (± 1 SE) for green (a), yellow (b) and red (c) leaf color on all dates sampled from June through October 1999. Asterisks indicate the first sampling date on which there was a significant change in color as determined by a Dunnett's test. In each panel, the occurrence of the first frost is indicated by an arrow. Day length (solid triangles) and mean minimum temperature between sample dates (solid circles) are also shown (d).

6.2 Recyclage des éléments minéraux durant la sénescence foliaire chez le hêtre



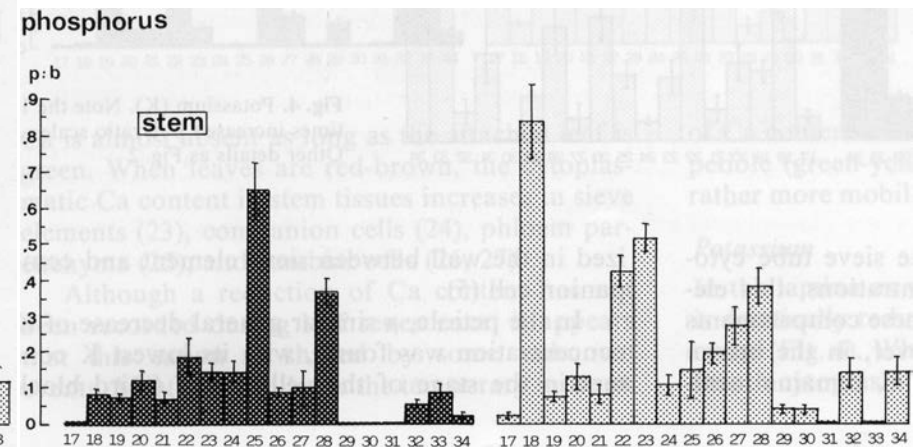
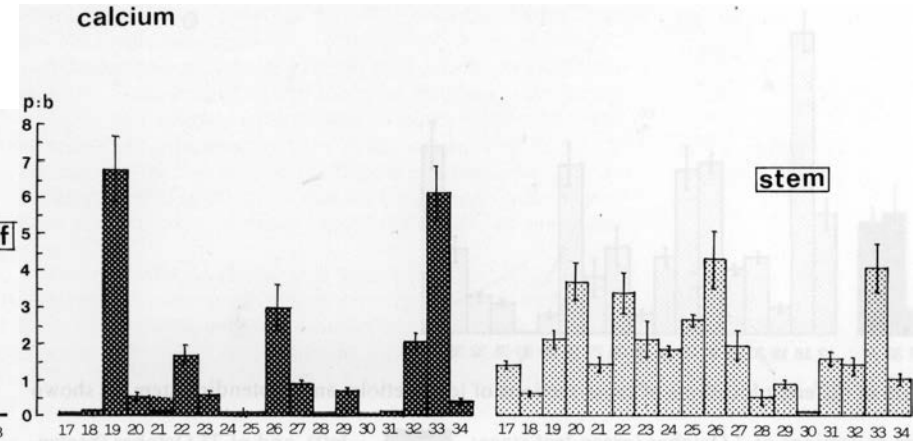
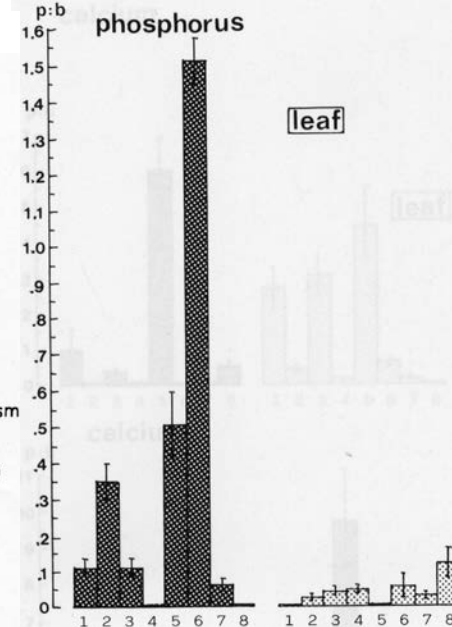
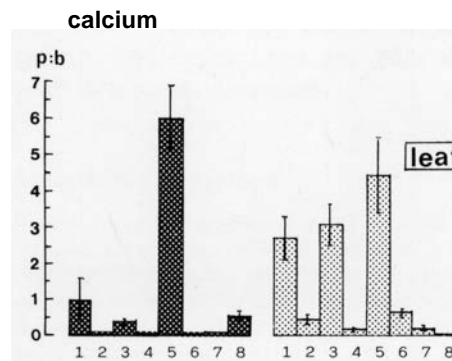
leaf





- 1 palisade cell, wall
- 2 palisade cell, cytoplasm
- 3 bundle sheath, wall
- 4 bundle sheath, cytoplasm
- 5 sieve element, wall
- 6 sieve element, cytoplasm
- 7 companion cell, cytoplasm
- 8 guard cell, cytoplasm



stem

- 17 periderm
- 18 cortex, cytoplasm
- 19 phloem fiber, primary wall
- 20 phloem fiber, secondary wall
- 21 phloem fiber, lumen
- 22 sieve element, wall
- 23 sieve element, cytoplasm
- 24 companion cell, cytoplasm
- 25 phloem parenchyma cytoplasm
- 26 cambial zone, wall
- 27 cambial zone, cytoplasm
- 28 ray parenchyma, cytoplasm
- 29 vessel, wall
- 30 vessel, lumen
- 31 xylem fiber, wall
- 32 xylem fiber, lumen
- 33 pith, wall
- 34 pith, cytoplasm



Data for leaf and stem were obtained from collections of 2 October (green-leaf stage: , left), and of 23 October (brown-leaf stage: , right). From petioles additional collections were evaluated: 9 October (green-yellow leaf stage: , second block), 16 October (yellow leaf stage: , third block).

The numbering of columns refers to the compartments listed in Fig. 1. The scale on the left side gives the peak to background ratio (p:b) of recorded X-ray signals. The p:b ratio is a measure of the element density in the surface layer of the tissue section from an area 200–250 nm in diameter.

The p:b ratios are mean values obtained from identical tissue compartments of several sections. The bars on top of the columns represent standard deviations

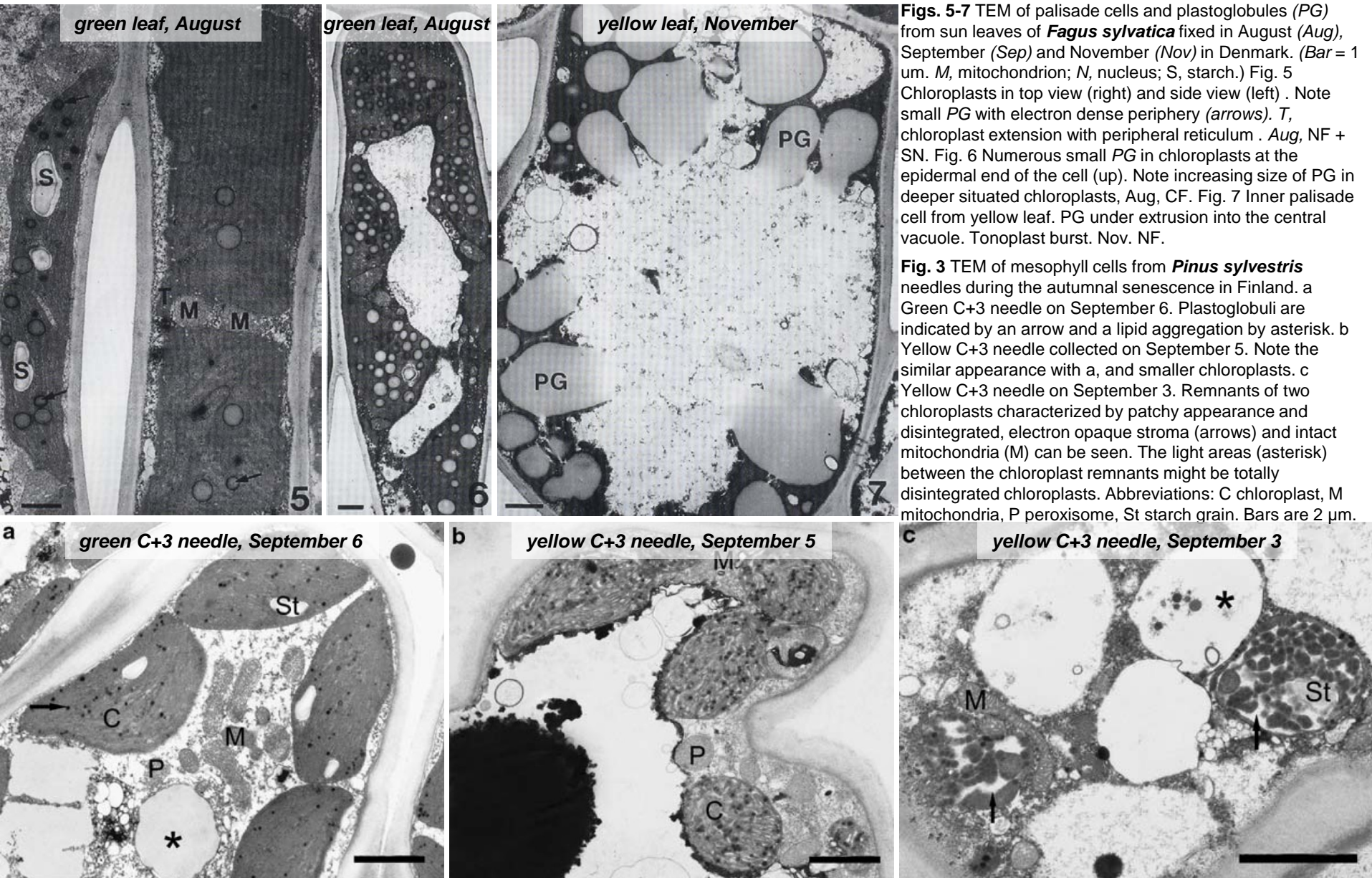
6.2 Encart no. 28: abondance et fonctions des éléments chimiques dans les plantes

Category	Element	Dry mass percent	Main function
macro-nutrient	carbon (C)	45	backbone of plants biomolecules
	oxygen (O)	42	backbone of plants biomolecules / respiration
	hydrogen (H)	6.5	backbone of plants biomolecules
	nitrogen (N)	1.5	backbone of proteins and other biomolecules
	potassium (K)	1	cell turgescence / nastic movements
	calcium (Ca)	0.5	structural component of cell wall pectins / cell homeostasis
	phosphorus (P)	0.2	bioenergetics / cell signaling / biosynthesis
	magnesium (Mg)	0.2	structural component of chlorophylls / enzymatic cofactor
	sulfur (S)	0.1	structural component of amino acids and vitamins
	silicon (Si)	traces	structural component of cell walls: rigidity and elasticity
micro-nutrients	iron (Fe)	traces	enzymatic cofactor / chlorophyll biosynthesis
	molybdenum (Mo)	traces	enzymatic cofactor / amino acids biosynthesis
	boron (B)	traces	stabilization of pectins in the cell wall
	copper (Cu)	traces	essential enzymatic cofactor
	manganese (Mn)	traces	enzymatic cofactor / oxygen production by photosystem II
	sodium (Na)	traces	carbon fixation in CAM and C4 plants / potassium substitute
	zinc (Zn)	traces	essential enzymatic cofactor / DNA transcription
	nickel (Ni)	traces	enzymatic cofactor in nitrogen metabolism
	chlorine (Cl)	traces	cell turgescence / ionic balance
toxic elements	cadmium (Cd), lead (Pb), mercury (Hg)	traces	no function



Adaptations à la dystrophie. Succulence (**A**): Détoxification du sel marin chez une salicorne halophyte par allocation des ions Na Cl en excès dans les vacuoles des parenchymes caulinaires. Carnivorie (**B**): Remédiation des déficiences, notamment en azote, sur craie lacustre chez une grassette commune par capture et digestion d'insectes. Ainsi, la dystrophie est généralement bien moins marquée dans les tissus végétaux que dans les sols.

6.2 Sénescence foliaire: répercussions sur la structure cellulaire dans le mésophylle



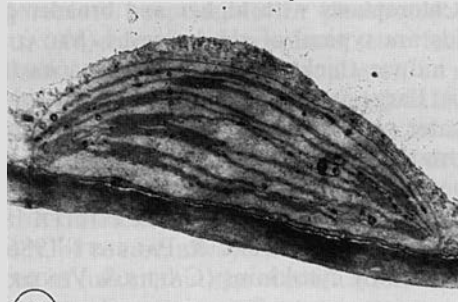
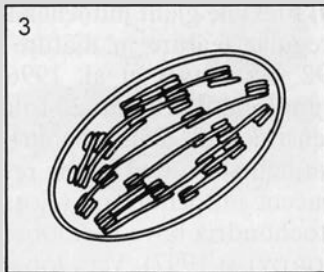
référence: - Mikkelsen et al. (1996). Acceleration of leaf senescence in *Fagus sylvatica* L. by low levels of tropospheric ozone demonstrated by leaf colour, chlorophyll fluorescence and chloroplast ultrastructure. *Trees* 10, 145-156.

- Kivimäenpää, M., Sutinen, S., (2007). Microscopic structure of Scots pine (*Pinus sylvestris* (L.)) needles. *Trees Structure and Function* 21, 645-659.

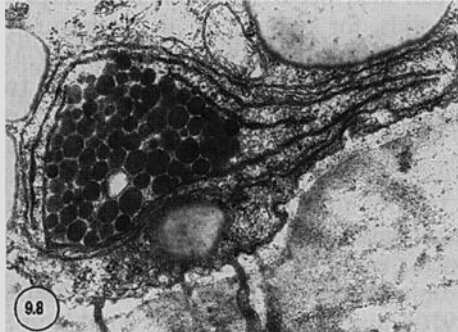
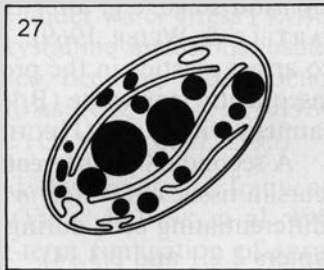
6.3 Encart no. 29: Les changements structuraux en tant que bioindications: à l'échelle subcellulaire

quelques exemples dans le cas des chloroplastes

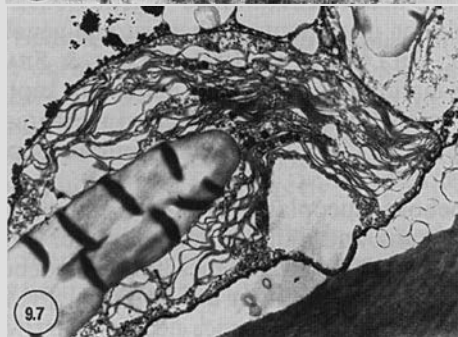
altérations structurales # contraintes physiologiques ou environnementales



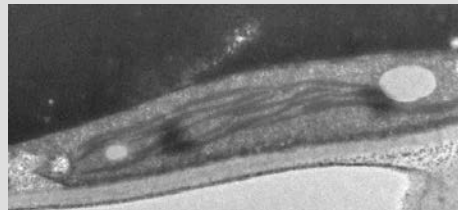
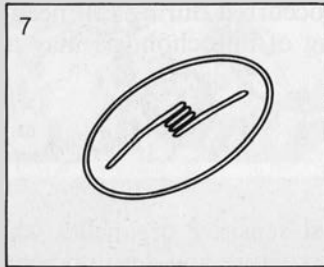
structure normale (stroma clair, systèmes de thylacoïdes et grana bien développé, pas de déstructuration membranaire, peu de plastoglobules) # conditions physiologiques normales



dégradation du stroma et des thylacoïdes, accumulation de plastoglobuli # sénescence automnale et facteurs d'accélération de la sénescence foliaire (feuilles devenues chlorotiques suite à une infection biotique, des carences minérales ou des polluants atmosphériques)



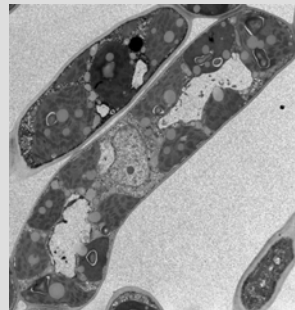
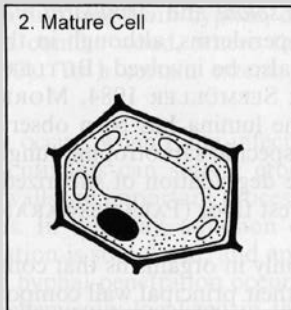
dilatation des thylacoïdes et destructuration des grana # déficiences minérales (notamment en N, Ca, Fe, B) / gel / refroidissements / infection virale



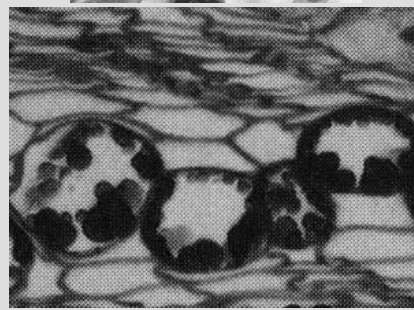
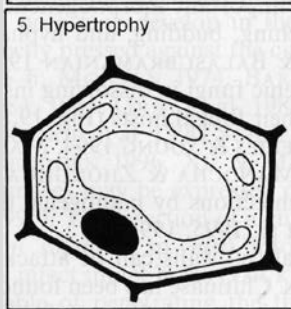
réduction de la taille, diminution de la fréquence des thylacoïdes et des granas, densité accrue du stroma, accroissement des thylacoïdes # ozone / déficiences minérales en N et/ou P

6.3 Encart no. 30: Les changements structuraux en tant que bioindications: à l'échelle de la cellule

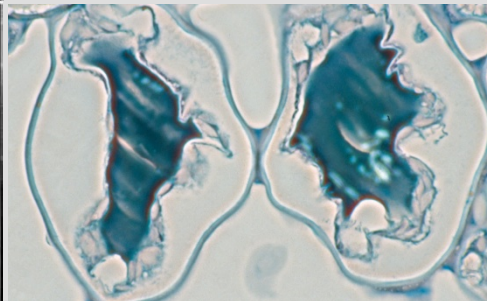
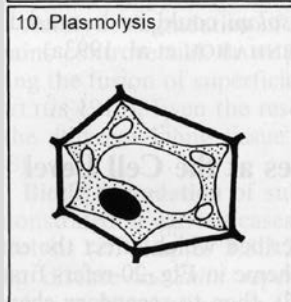
altérations structurales # contraintes physiologiques ou environnementales



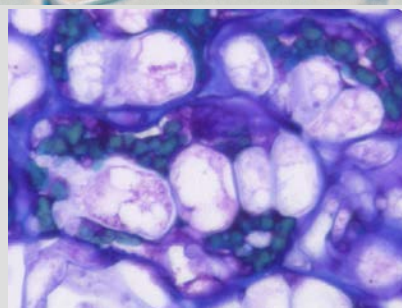
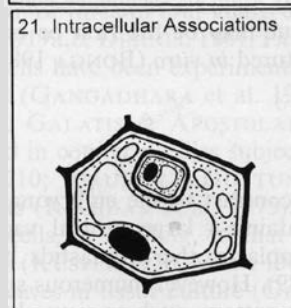
structure normale (taille, structure subcellulaire et métabolites secondaires caractéristiques du degré d'activité physiologique constitutif du type cellulaire observé au moment du prélèvement) # conditions physiologiques normales (ex: cellules de mésophile foliaire de hêtre en fin de saison de végétation)



dilatation de la cellule fréquemment associée à l'accumulation de métabolites secondaires. Les cellules adjacentes sont fréquemment nécrotiques, écrasées et plus ou moins oblitérées # souvent en association avec une nécrose partielle du tissu résultant d'un changement de l'activité physiologique constitutive ou en conséquence d'un facteur de stress biotique ou abiotique (ex: dilatation de cellules parenchymateuses dans le phloème secondaire non conducteur de *Pinus strobus*)



séparation du protoplasme et de la paroi, sauf au niveau d'une partie au moins des plasmodesmes, rétraction de la vacuole, condensation et oxidation partielle du contenu cellulaire # stress hydrique / gel (ex.: dégâts de gel dans le mésophile d'aiguilles de *Pinus cembra*)



colonisation des cellules et de l'espace intercellulaire par un micro-organisme exogène (cohabitation de structure végétales et micro-organismiques), perforation des parois, dégradation du matériel cellulaire et accumulation de composés de défense # infection fongique ou bactérienne (ex: infection d'aiguille de *Pseudotsuga menziesii* avec l'ascomycète pathogène *Rhaddoclone menziesii*).

6.3 Contraintes anthropiques sur les écosystèmes terrestres: (I) pollution de l'air en Suisse

Fig. 1: Émissions totales de gaz à effet de serre

Émissions intérieures de CO₂, CH₄ et N₂O et émissions de gaz synthétiques (HFC, PFC, SF₆ et NF₃) de la Suisse, en équivalents CO₂, de 1900 à 2018.

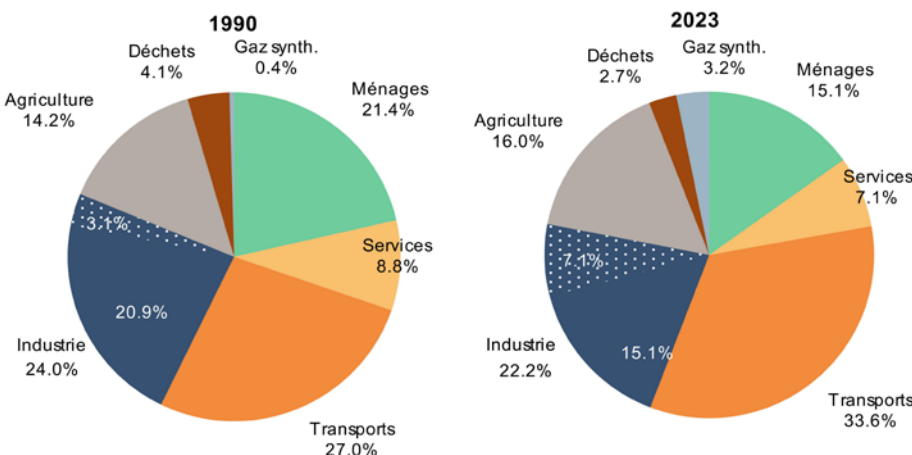
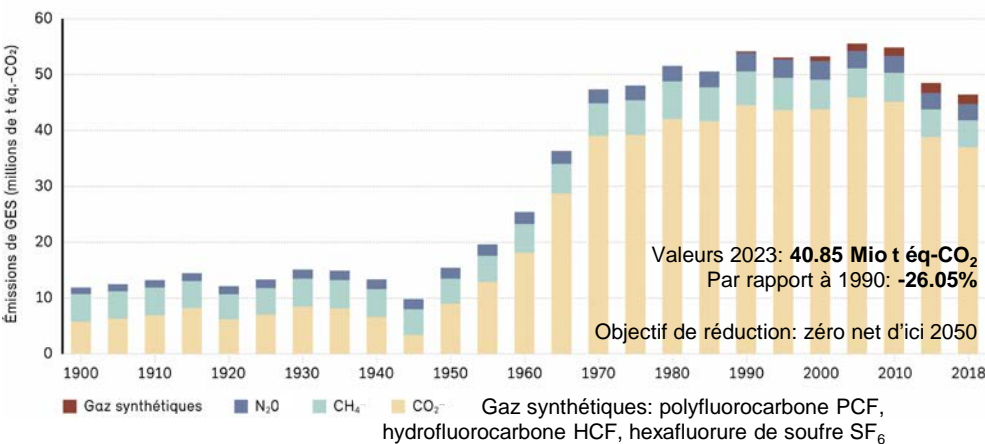


Figure 2-1 : Émissions par secteur (émissions totales de GES) en 1990 et en 2023. Les ménages et les services forment ensemble le secteur du bâtiment. Dans le secteur de l'industrie, la partie représentée avec des points indique les émissions dues à l'incinération des déchets dans les usines d'incinération des ordures ménagères et les installations d'incinération des déchets spéciaux ainsi qu'en tant que combustible alternatif

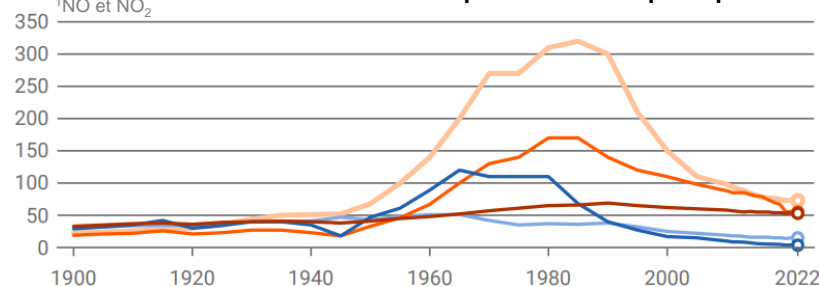
Source:

- OFEV et al. (2020), Changements climatiques en Suisse.

(<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/changements-climatiques-suisse.html>)

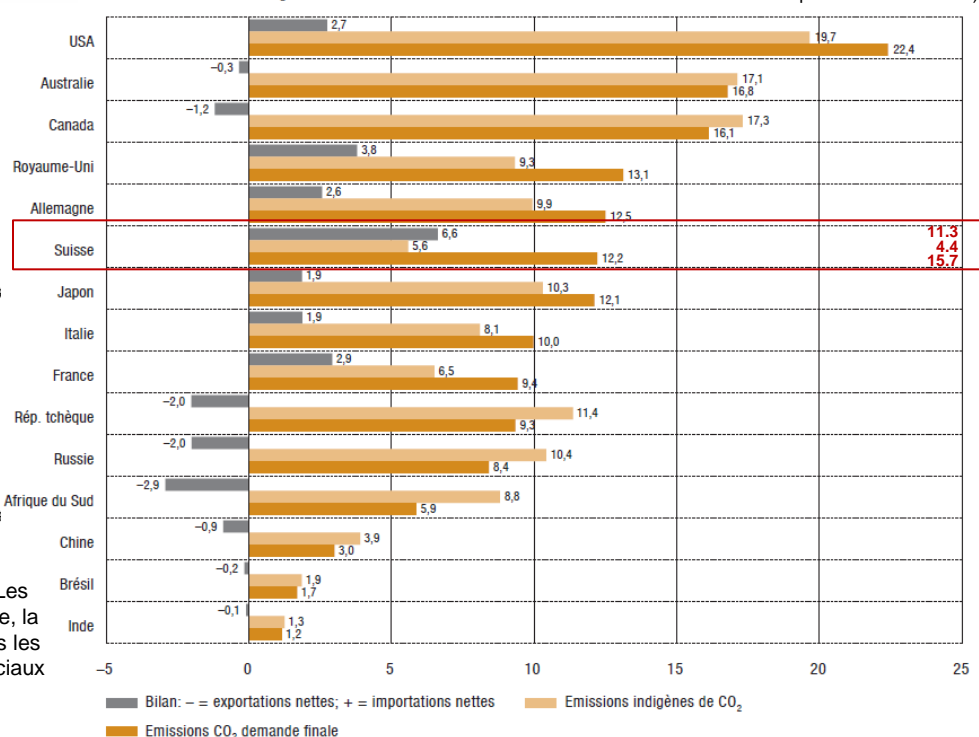
- OFEV (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/etat/donnees/inventaire-gaz-effet-serre.html>)

Composés organiques volatils non méthaniques (COVNM)
Oxydes d'azote (NOx)¹ Ammoniac (NH₃) Poussières fines (PM₁₀)
Dioxyde de soufre (SO₂)



émissions de CO₂ par habitant en comparaison internationale - valeurs 2013 - 2017

(émissions dues à l'utilisation de combustibles fossiles – sans compter les émissions des vols internationaux et celles dues à la production de ciment)



6.3 Contraintes anthropiques sur les écosystèmes terrestres: (II) pollution des sols en Suisse

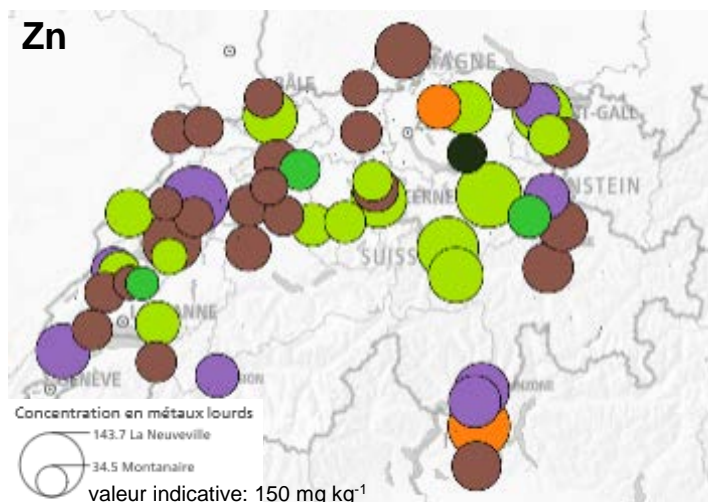
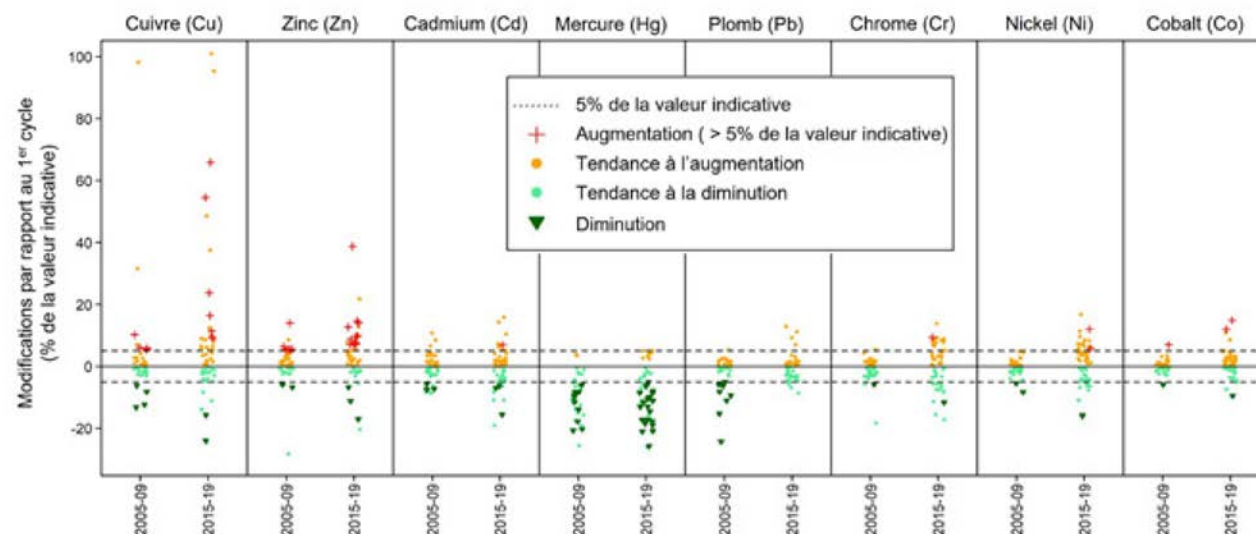
Résultats actuels du réseau national d'observation des sols (Nabo, > 100 sites, représentatif de l'utilisation des sols).

Depuis 20 ans:

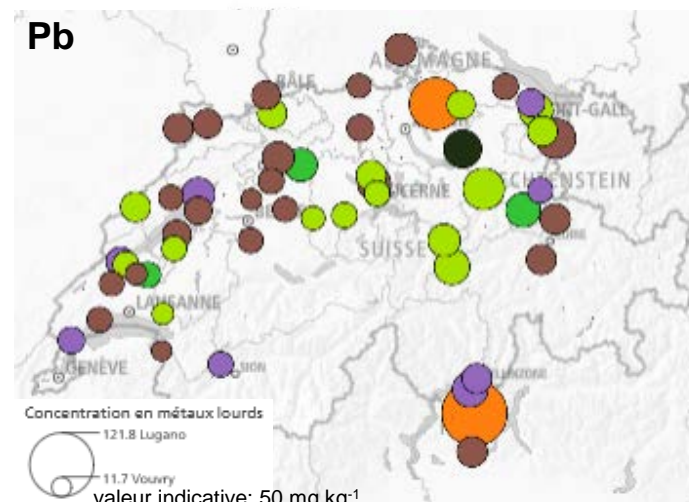
- Ni, Cr, Co: aucune évolution significative (provenance: roche mère)
- Cd: tendance non significative à l'augmentation dans certains sites, suite à l'utilisation d'engrais phosphorés minéraux
- Pb, Hg: nette baisse dans les horizons supérieurs du sol, suite à l'amélioration de la qualité de l'air et la migration dans les sols
- Zn, Cu: nette augmentation dans les herbages à utilisation intensive, suite à l'épandage des engrais de ferme
- Cu: dépassement des valeurs indicatives dans les cultures spéciales pérennes (viticulture, arboriculture, cultures maraîchères).

Nouvelles préoccupations environnementales: résidus de produits phytosanitaires / carbone organique / propriétés microbiologiques

Fig. 4: Évolution des concentrations de métaux lourds dans la couche supérieure du sol entre le 1^{er} cycle (1985 à 1989) et respectivement le 5^e cycle (2005 à 2009) et le 7^e cycle (2015 à 2019), les concentrations étant exprimées comme pourcentages de la valeur indicative correspondante fixée dans l'OSol (1998) et, pour le cuivre, dans l'OSol (1986).



Utilisation du sol ● Culture des champs ● Prairies ● Forêt mixte ● Forêt résineuse ● Cultures spéciales ● Parc urbain



Source (OFEV):

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/sol/publications-etudes/publications/l-observatoire-national-des-sols-nabo.html>

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/sol/etat/visualisation-de-la-pollution-des-sols-par-les-metaux-lourds.html>

6.3 Encart no. 31: Charges critiques en azote dans les écosystèmes suisses

Figure 2
Dépôts de composés azotés en Suisse en 2015

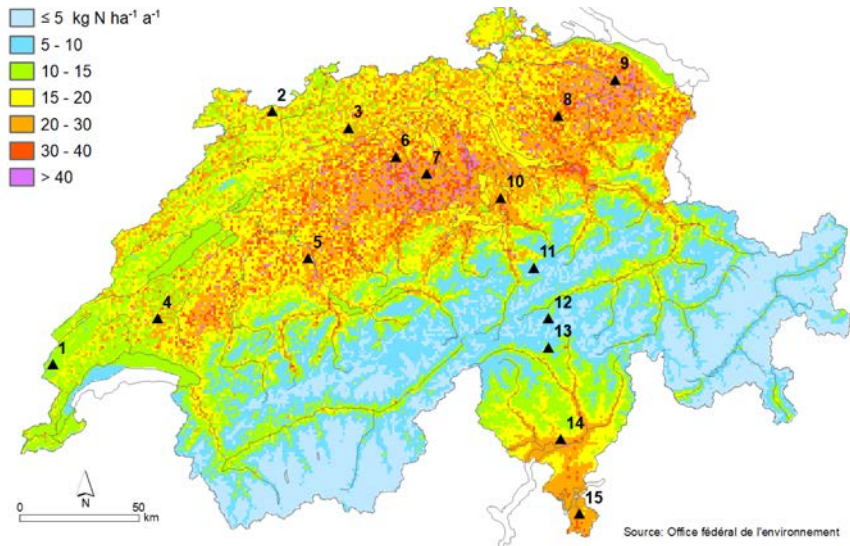


Figure 4
Dépassements des charges critiques pour l'azote

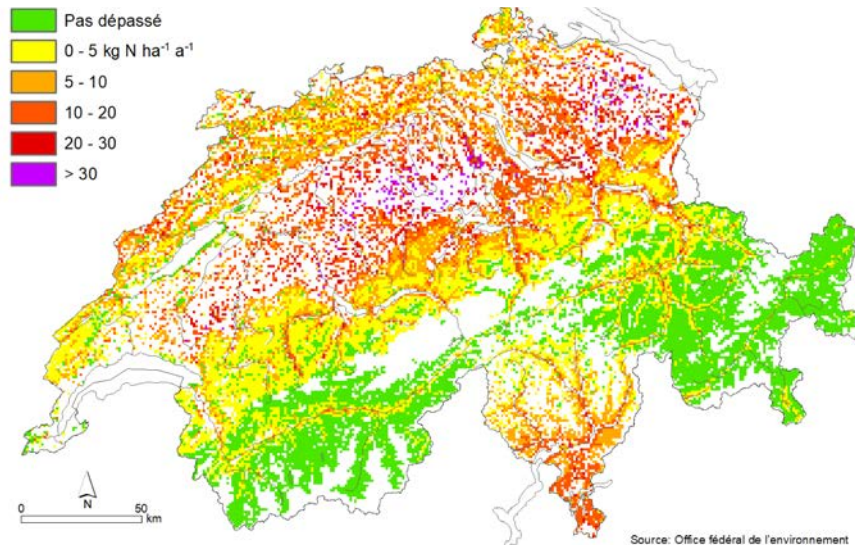


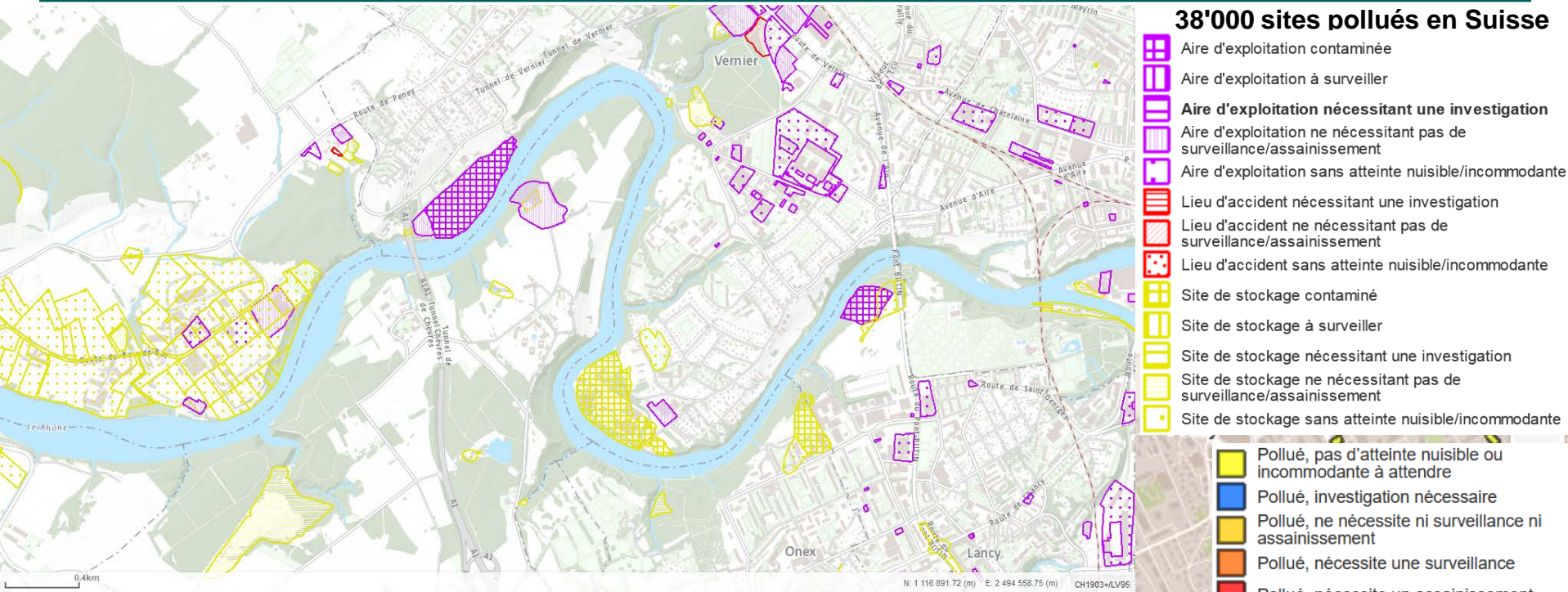
Tableau 2

Charges critiques empiriques (CLN) applicables pour les écosystèmes présents en Suisse CLRTAP 2017

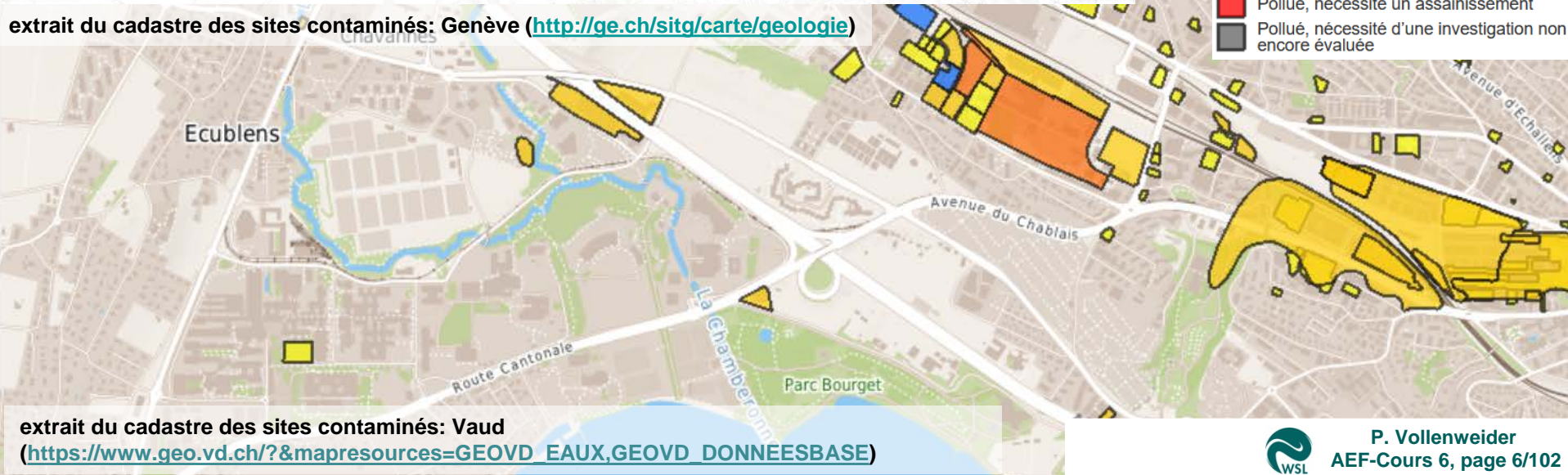
Ecosystèmes	Charge critique ^a kg N ha ⁻¹ a ⁻¹	Effets en cas de dépassement
Forêts de résineux ^b	5-15 °	Modifications des processus dans le sol; Déséquilibres nutritionnels, Perturbation de la végétation mycorrhizienne dans le sol
Forêts de feuillus ^b	10-20 °	Modifications des processus dans le sol; Déséquilibres nutritionnels, Perturbation de la végétation mycorrhizienne dans le sol
Végétation alpine de buissons nains	5-15 °	Recul des lichens, des mousses et des buissons nains persistants
Pelouses naturelles sèches sur sol acide ou neutre	10-15 °	Augmentation des graminées, diminution des espèces typiques, diminution de la diversité des espèces
Pelouses (mi)-sèches riches en espèces sur calcaire	15-25 °	Augmentation des graminées hautes, diminution de la diversité des espèces, minéralisation accrue, lessivage de l'azote, acidification en surface
Prairies à molinie	15-25 °	Augmentation des graminées, diminution de la diversité des espèces, recul des mousses
Prairies de fauche de montagne	10-15 ° ^{cd}	Augmentation des graminées hautes nitrophiles, diminution de la diversité des espèces
Prairies subalpines	5-10 °	Modification de la composition et augmentation de la productivité végétale
Bas-marais oligotrophes	10-15 °	Multiplication des laïches (carex) et des plantes vasculaires; impacts négatifs sur les mousses
Bas-marais mésotrophes	15-30 °	Augmentation des graminées hautes, recul des mousses
Haut-marais	5-10 °	Multiplication des plantes vasculaires; modification de la croissance et de la composition des espèces de mousses, augmentation de la teneur en azote dans la tourbe et l'eau de la tourbe
Bord de lacs et d'étangs oligotrophes peu profonds (végétation temporaire des grèves)	3-10	Modification de la composition des macrophytes; production accrue d'algues; déplacement de la limitation nutritive de N vers P
Lacs oligotrophes alpins	3-5 °	Déplacement des associations et production accrue de phytoplancton

6.3 La contamination des sols: un problème environnemental sérieux pour la Suisse (I)

38'000 sites pollués en Suisse



extrait du cadastre des sites contaminés: Genève (<http://ge.ch/sitg/carte/geologie>)



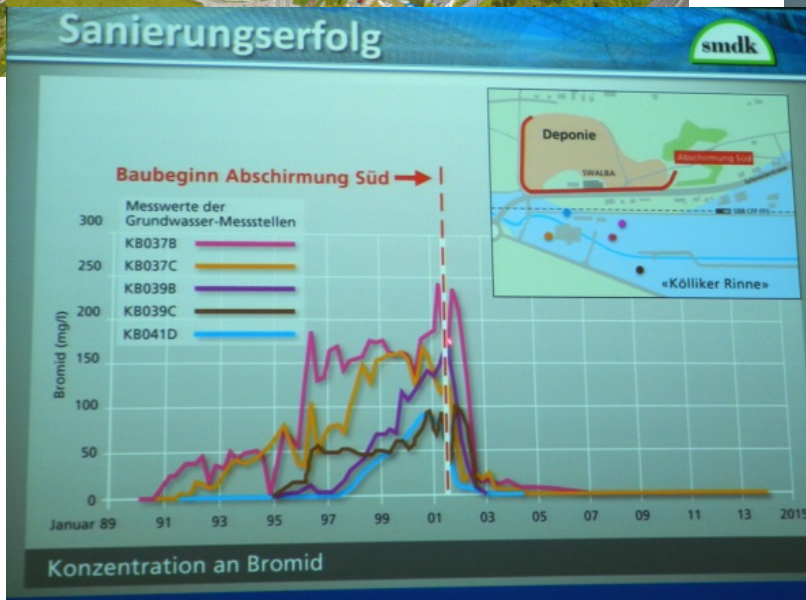
extrait du cadastre des sites contaminés: Vaud
(https://www.geo.vd.ch/?&mapresources=GEOVD_EAUX,GEOVD_DONNEESBASE)

6.3 La contamination des sols: un problème environnemental sérieux pour la Suisse (II)

exemple: la décharge pour déchets spéciaux de Kölliken (Argovie)



4'000 sites contaminés présentant une menace pour l'homme et l'environnement. Kölliken fut le plus grand site contaminé de Suisse



excavation en phase finale dans la halle (mai 2015)



- site: ancienne glaisière (profondeur: 15 m) dans une zone bâtie
- exploitation: 1978-1985 entreposage de: mâchefers d'usine d'incinération, résines acides, résidus de distillation, piles usagées ou munitions périmées (475'000 t)
- dangerosité: contamination d'aquifères (bassin de population: > 300'000 habitants)
- confinement, excavation, analyse et traitement des déchets: 2005-2015
- coût total: 0.8-1 milliard Frs; plus de 600'000 t excavées

6.3 La végétalisation: une solution pour la gestion des sites faiblement contaminés

absorption et stabilisation des métaux lourds dans la biomasse végétale

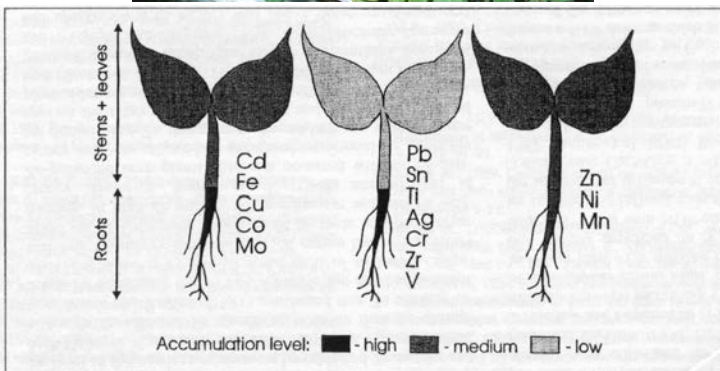
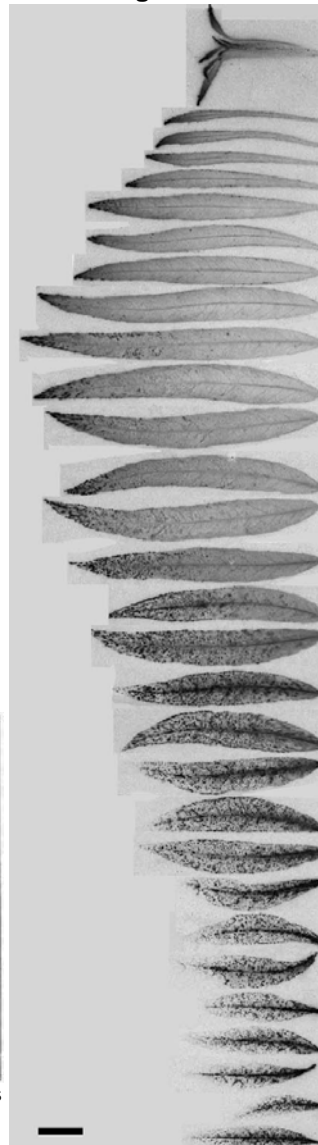


Fig. 1. Different schemes of heavy metal distribution between plant roots and shoots.



allocation du cadmium dans un clone tolérant de saule

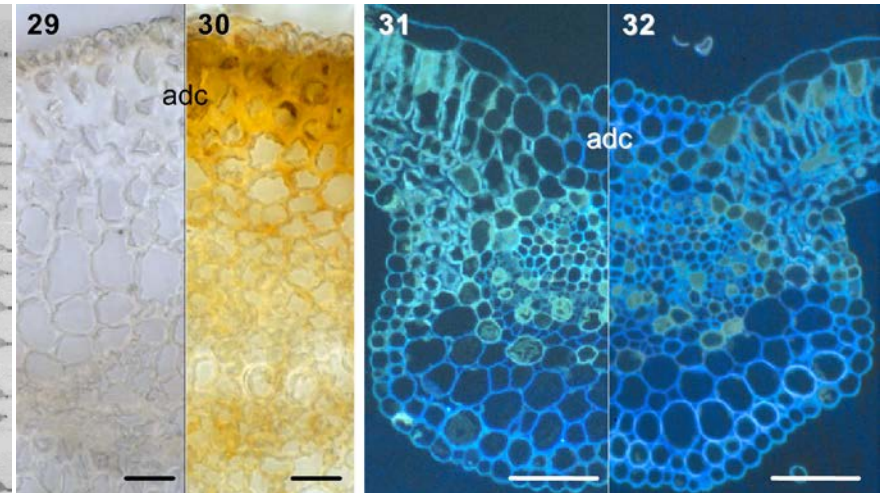


Fig. 4. (...) Cd allocation and adaptation of cell walls to Cd storage in a Cd-tolerant clone of *Salix viminalis* exposed to 0 (29 and 31) and 10 (30 and 32) μM Cd under hydroponic conditions. 30 vs. 29 Yellowish to brownish tones indicate where Cd preferentially accumulated in Cd-treated samples whereas no signal was observed in control 29. Especially, the cell walls in collenchyma (adc, adaxial collenchyma) provided a safe Cd storage compartment away from sensitive and metabolically more active leaf tissues. 32 Leaves of Cd-treated samples showed adaptation to the storage of Cd by a regular thickening of cell walls with cellulosic material as indicated by a more intense blue fluorescence of the cell walls in 32 vs. 31. Bars: 25 μm (29 and 30), 50 μm (31 and 32).

Fig. 4. Cadmium visualization in leaves: autoradiographs of leaves of 6-week-old *S. viminalis* grown in hydroponics with $2.2 \times 10^{-3} \mu\text{M}$ of ^{109}Cd and $10 \mu\text{M}$ ^{112}Cd . Leaves are ordered according to their position on the shoot. The youngest leaf is at the top and the oldest at the bottom (film exposure: 48 h). Bar: 1 cm.

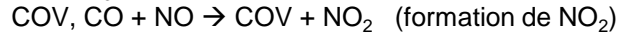
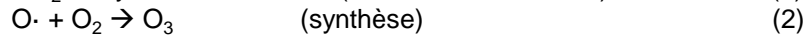
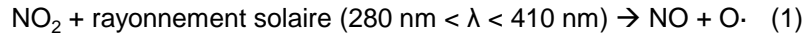
référence:

- Siedlecka (1995). Some aspects of interactions between heavy metals and plant mineral nutrients. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 64, 265-272.
- Cosio, C., Vollenweider, P., Keller, C., 2006. Localization and effects of cadmium in leaves of tolerant willows (*Salix viminalis* L.). Part I. Macrolocalization and phytotoxic effects of cadmium. *Environmental and Experimental Botany* 58, 64-74.
- Günthardt-Goerg and Vollenweider (2007). Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees: New diagnostic perspectives. *Environmental Pollution* 147, 467-488.

6.3 Pollution de l'air: peu d'améliorations dans le cas de l'ozone

Ozone atmosphérique

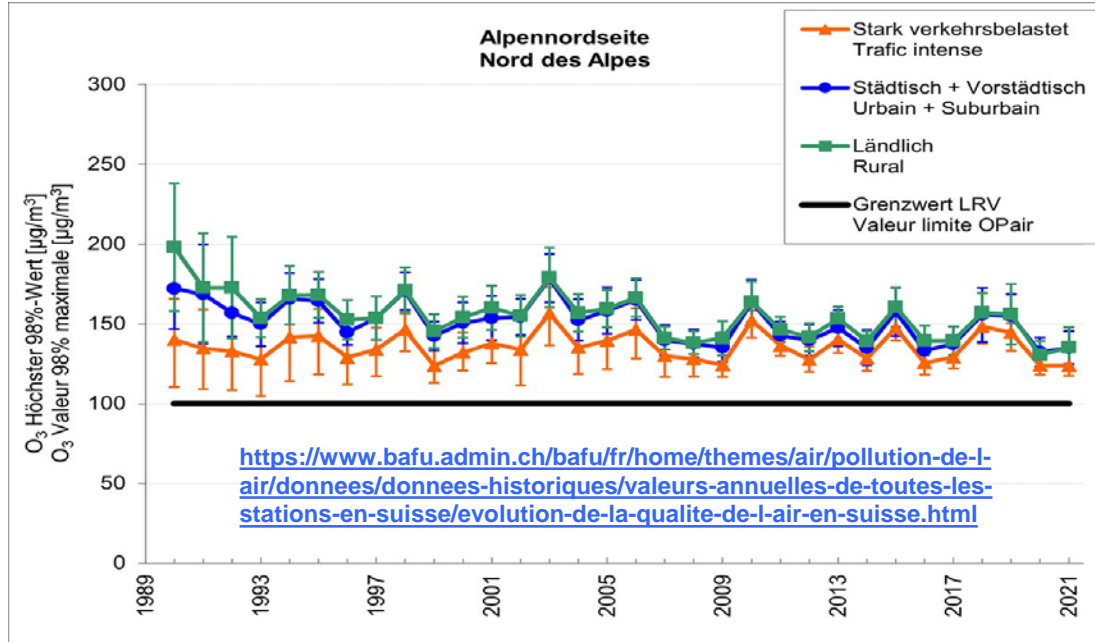
- polluant secondaire à la chimie complexe. Schématiquement:



concentration dépendante de l'insolation et variant en cours de journée (pic en milieu d'après-midi); dégradation nocturne en milieu urbain seulement

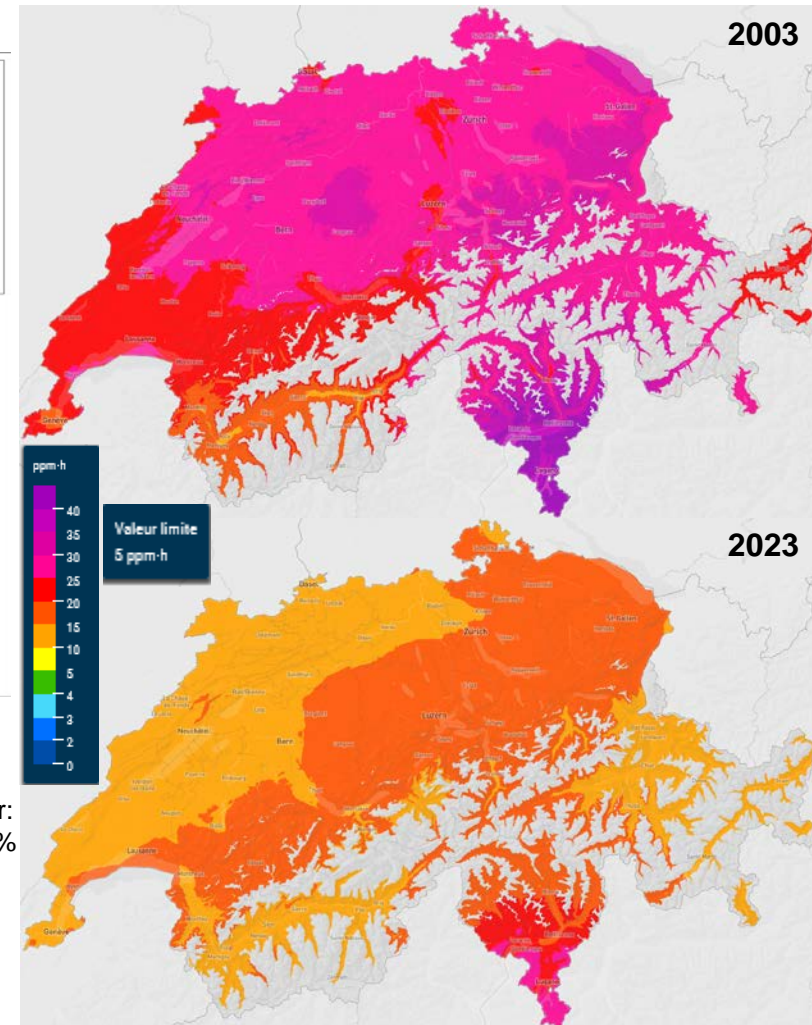
source: - NOx: combustion de carburants fossiles, surtout le trafic routier.

- Composés Organiques Volatils (COV): évaporation de solvants et de carburants/combustion incomplète, artisanat, trafic, (terpénoïdes végétaux)



- 1990-2014: diminution des précurseurs en Suisse de 50% (NOx) et 70% (COV)
- les pics d'ozone sont moins fréquents. Les concentrations d'ozone ont légèrement diminué depuis le début du siècle. Au plus une légère décroissance est attendue jusqu'en 2050
- les concentrations actuelles sont toujours trop hautes et ont des conséquences néfastes pour:
 - la population: irritation des voies respiratoires / réduction de la capacité pulmonaire (5-30% selon les personnes et la concentration en ozone) / décès prématurés supplémentaires (2015: Europe: 17'700, Suisse: 300)
 - la végétation: baisses de rendement (Europe: pertes économiques pour le blé estimées à 3.2 Mrd € en 2000 et 2 Mrd € pour 2020), diminution de l'accroissement des arbres (CH: -11 % en Suisse de 1991 et 2011, chez le hêtre et l'épicéa), symptômes visibles.

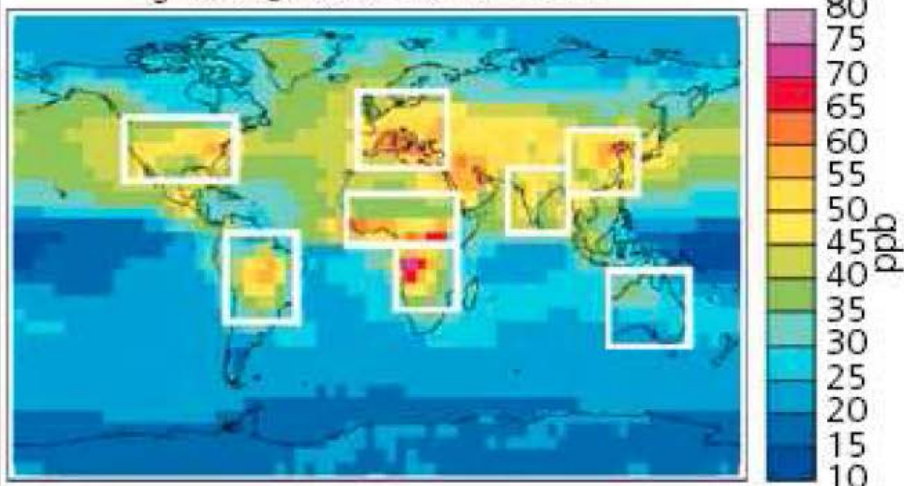
Exposition à l'ozone pour les forêts: AOT40f



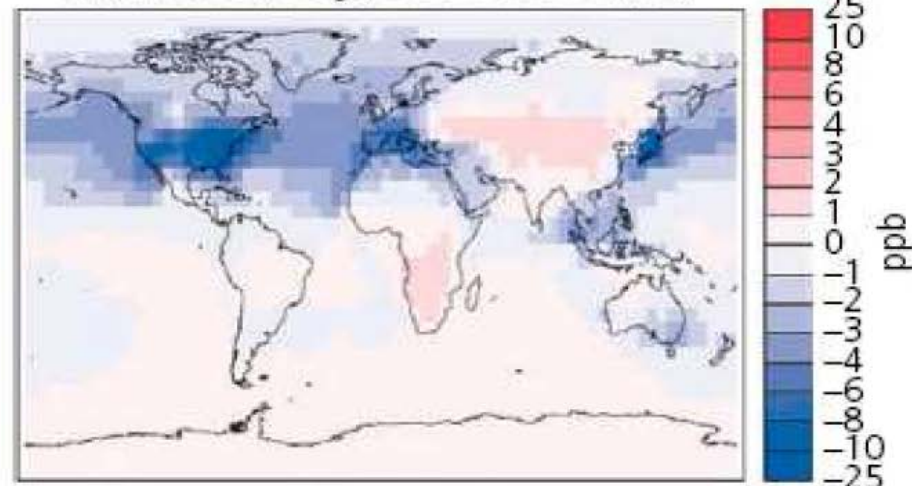
Pour en savoir plus: <https://www.wsl.ch/fr/foret/ozon/quiz-sur-lozone/>
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-in-europe-2020-report>

6.3 Encart no. 29: concentrations d'ozone dans le monde au XXI^{ème} siècle

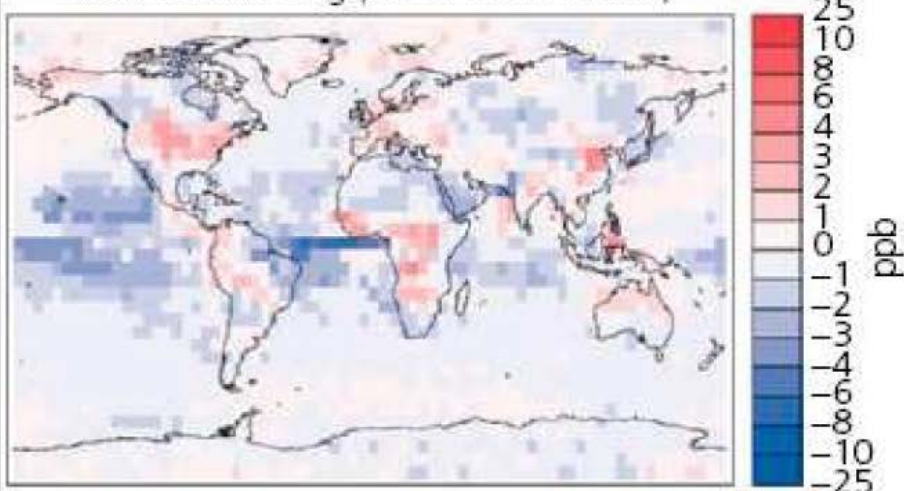
O₃ during max. season Y2000



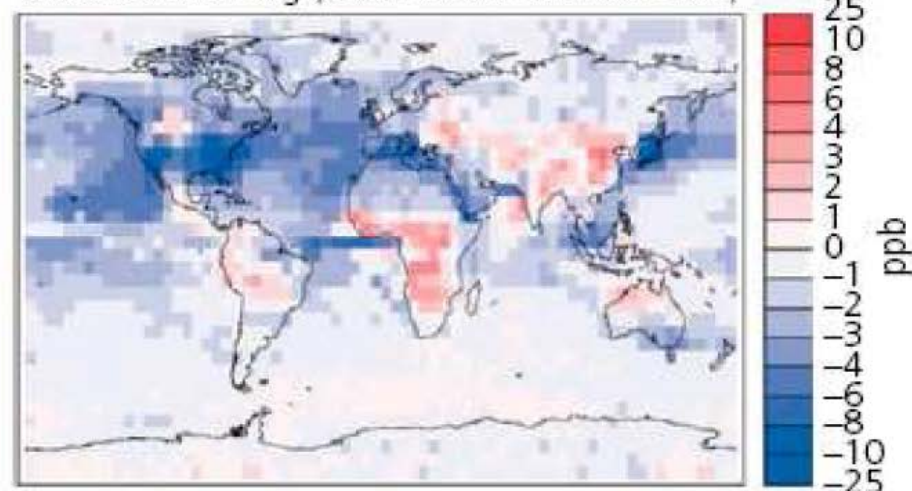
Max. season ΔO_3 (2050–2000 ΔE_{miss})



Max. season ΔO_3 (2050–2000 ΔClim)



Max. season ΔO_3 (2050–2000 $\Delta E_{\text{miss}} + \text{Clim}$)



Jusque dans un passé récent, les concentrations d'ozone les plus importantes étaient mesurées dans les régions industrialisées de l'hémisphère nord. Suite à la mise en place de mesures de réduction, un déclin des concentrations les plus élevées, une légère baisse des concentrations moyennes mais une augmentation des valeurs basses (background) ont été constatés, en raison de l'augmentation des émissions à plus faible latitude, notamment en Inde et en Chine. Au XXI^{ème} siècle, c'est dans ces dernières régions et en Afrique, là où les mesures de régulation sont les moins avancées, que les concentrations les plus importantes d'ozone devraient être mesurées. Ailleurs, le déclin attendu des émissions sera partiellement contrebalancé par les changements climatiques en cours, causant une recrudescence de jours avec de fortes concentrations.

référence: Garthwaite et al (2009) Ground level ozone in the 21st century:

Trends, interactions with climate and environmental impacts. DOI: 10.1088/1755-1307/6/28/282002

6.3 Bioindication de l'ozone: changements structuraux et stress oxydant chez le hêtre



symptômes d'ozone
sur une branche de hêtre
(Isone/TI, 31 août 2023)



asymptomatique



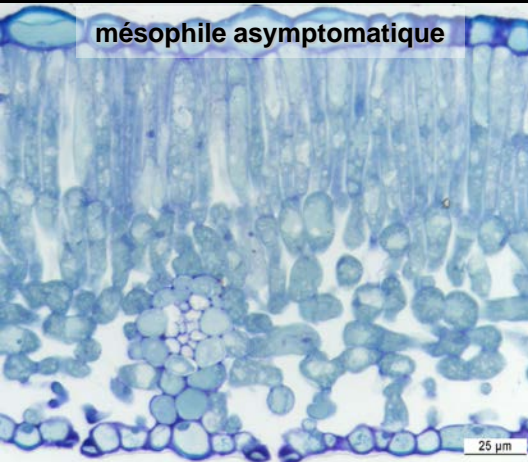
bronzing



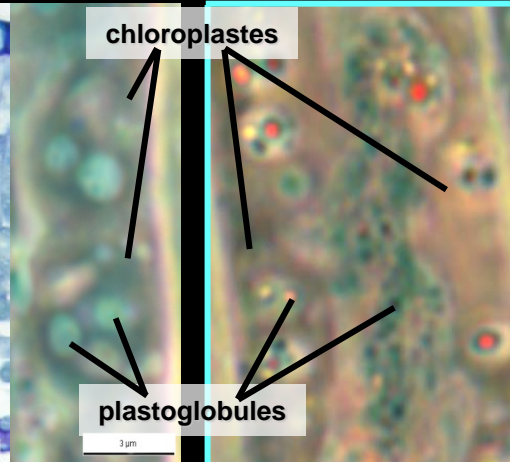
bronzing



bronzing & stippling intercostal

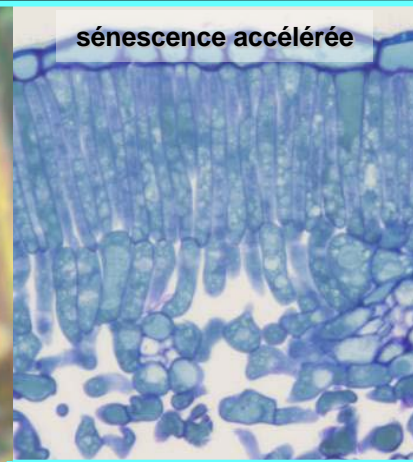


mésophyle asymptomatique



chloroplastes

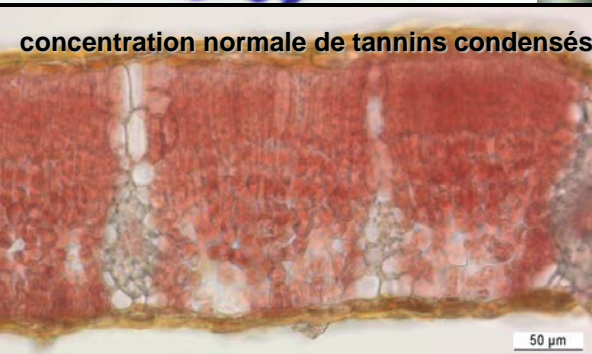
plastoglobules



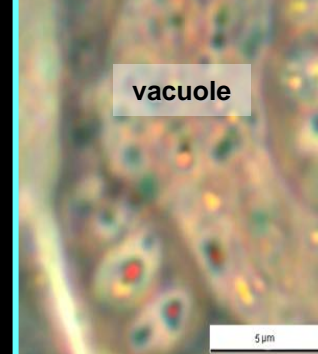
sénescence accélérée



réponse hypersensible



concentration normale de tannins condensés



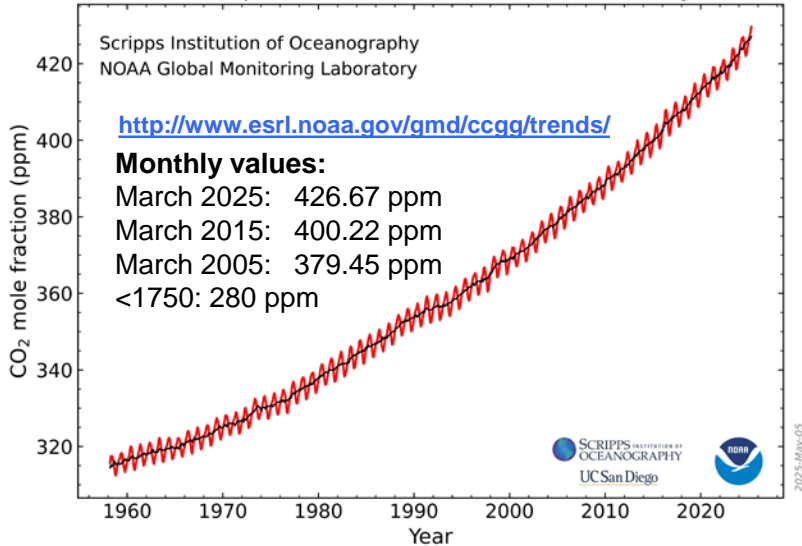
vacuole



accumulation adaxiale de tannins condensés

6.3 Le réchauffement climatique (I): augmentation de la température en raison des activités humaines

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



Réchauffement actuel total en Suisse par rapport à la moyenne 1871-1900: **+2.8 °C** (valeur 2024)

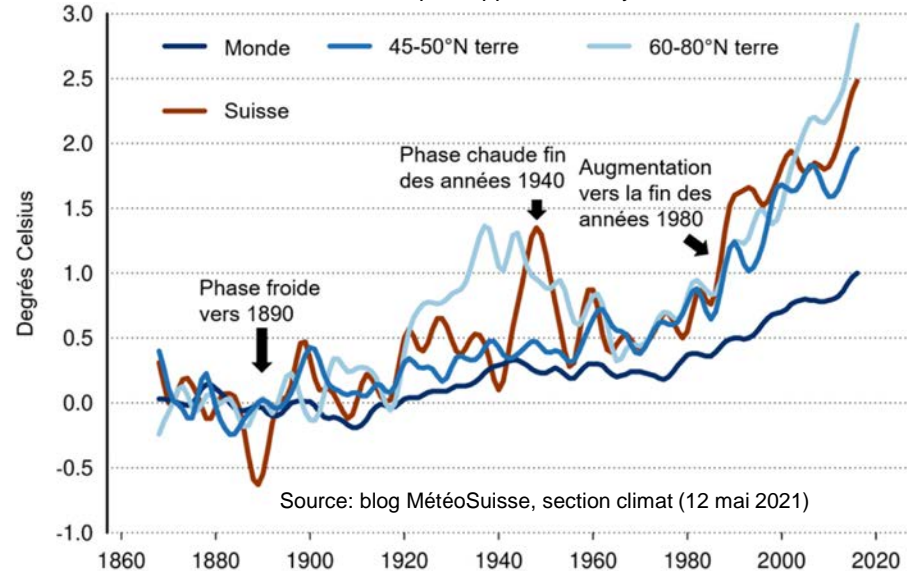


Figure 2. Evolution de la température proche de la surface pour la moyenne suisse (brun), globale (bleu foncé) ainsi que 45-50° N sur terre (bleu) et 60-80° N sur terre (bleu clair) Les valeurs moyennes annuelles mobiles sur 10 ans des écarts par rapport à la moyenne pour la période 1871-1900 sont représentées. Données (globales /latitude): CRUTEM v4.6.0.0 (University of East Anglia et Met Office).

Land surface

Land and ocean surface

Ocean heat content

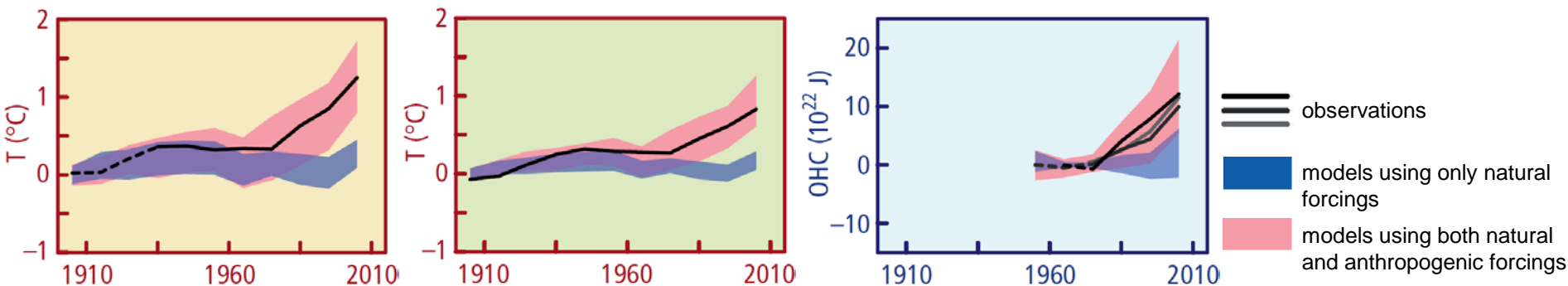


Figure 1.10 Comparison of observed and simulated change in continental surface temperatures on land, land and ocean surface and on the upper ocean heat content. Anomalies are given relative to 1880–1919 for surface temperatures, to 1960–1980 for ocean heat content, and to 1979–1999 for sea ice. All time series are decadal averages, plotted at the centre of the decade. Observations are dashed lines if the spatial coverage of areas being examined is below 50%. For ocean heat content and sea ice panels, the solid lines are where the coverage of data is good and higher in quality, and the dashed lines are where the data coverage is only adequate, and, thus, uncertainty is larger (note that different lines indicate different data sets). Model results shown are CMIP5 multi-model ensemble ranges, with shaded bands indicating the 5 to 95% confidence intervals.

référence: - OFEV et al. (2020) Changements climatiques en Suisse.

- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp..

6.3 Encart no. 31: projections climatiques d'ici la fin du XXI^{ème} siècle (I): scénarios climatiques

Dans le cadre du rapport de synthèse 2014 de l'IPCC (intergovernmental panel on climate change), on est passé de scénarios de forçage climatique basés sur des projections d'émissions de gaz à effet de serre (standardized reference emission scenarios **SRES**) à des scénarios basés sur les concentrations projetées (representative concentration pathways **RCP**), tenant compte de l'effet d'absorption du carbone par les océans et les écosystèmes terrestres.

Les nouveaux scénarios climatiques suisses (RCP2.6, 4.5, 8.5) remplacent désormais les SRES de l'édition précédente (CH2011).

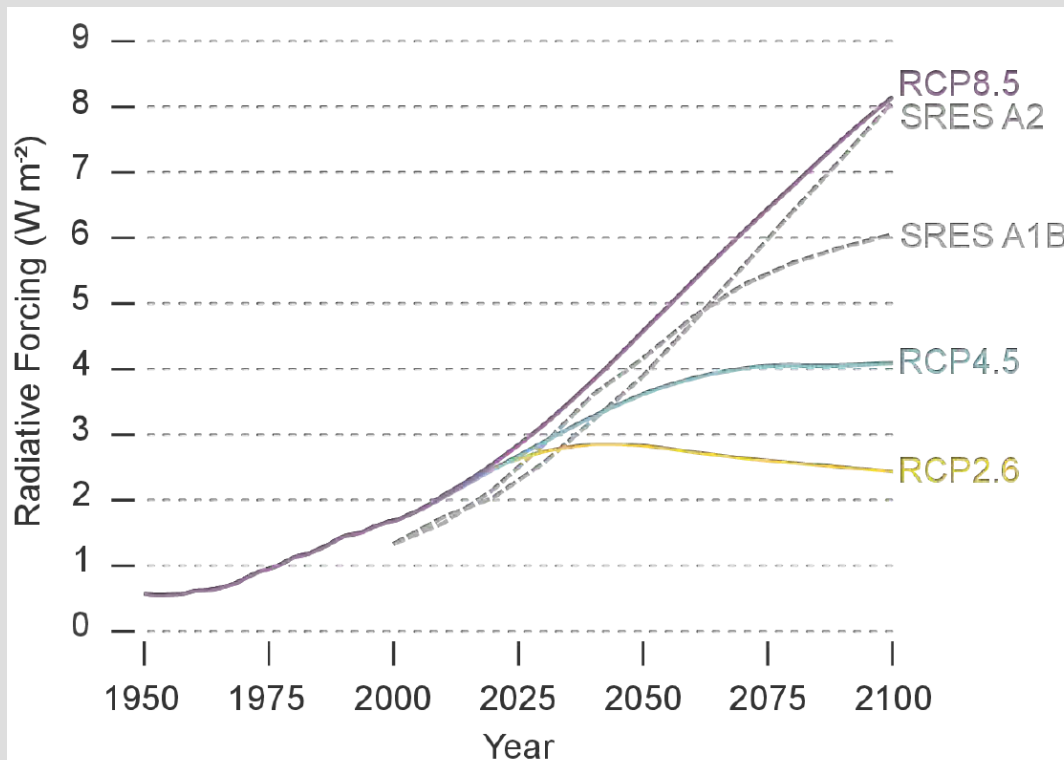


Figure 2.4. Radiative forcing with respect to pre-industrial levels for the three RCPs used in the CH2018 report (colored lines). The dashed grey lines show the two SRES scenarios that were used in CH2011. RCP2.6 was also included in CH2011, but is labeled “RCP3PD” for historical reasons. The atmospheric CO₂ concentration and radiative forcing (RF) corresponding to the SRES emission scenarios can only be calculated within some uncertainty related to the uptake of CO₂ by the ocean and the land biosphere; the RF shown for the SRES emission scenarios do not account for this carbon cycle uncertainty. The RF shown at the end of the century does not exactly correspond to the nominal forcing levels of the RCPs, as forcing was implemented in terms of greenhouse gas concentrations or emissions, which results in slightly different RF in the various models.

Scenario	Pathway	Global changes until 2100 relative to 1850 to 1900
RCP8.5	Unabated emissions	Continuously increasing RF (8.5 W m ⁻² , 1370 ppm CO ₂ eq) and GMT (4 - 5 °C)
RCP4.5	2°C-non-compliant mitigation	Emissions decline after 2050, stabilization of RF (4.5 W m ⁻² , 650 ppm CO ₂ eq), increasing GMT (~2.5 °C)
RCP2.6	2°C-compliant mitigation	Implies strong reduction of greenhouse gas emissions early in the 21st century, peak and decline of RF (2.6 W m ⁻² , 490 ppm CO ₂ eq), stabilization of GMT (< 2 °C)

6.3 Encart no. 31: projections climatiques d'ici la fin du XXI^{ème} siècle (II): températures et précipitations

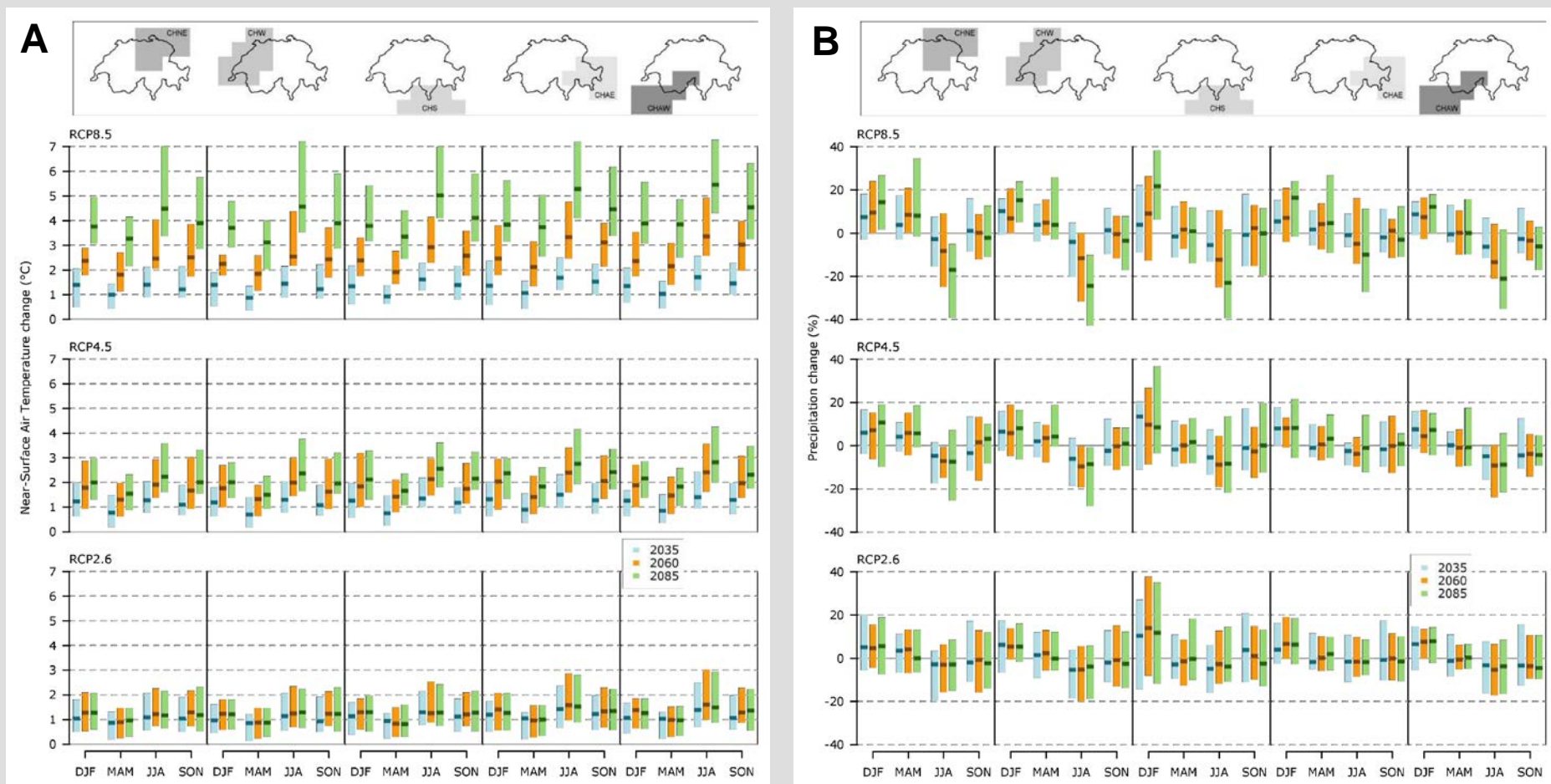


Figure 4.4. and 4.5: Projected future change in median temperature (**A** in °C) and precipitations (**B** in %) for winter (DJF: December - February), spring (MAM: March - May), summer (JJA: June - August), and autumn (SON: September - November) in northeastern Switzerland (CHNE), western Switzerland (CHW), southern Switzerland (CHS), eastern Alps (CHAE), and western Alps (CHAW). Projections are for 30-year averages centred at 2035 (blue), 2060 (orange), and 2085 (green) with respect to the reference period 1981 - 2010. Three emission scenarios are considered: RCP8.5 (top row), RCP4.5 (middle row), and RCP2.6 (bottom row). The lower and upper bounds of the colored bars represent the empirical quantile range, spanning the lower (5 %) and upper (95 %) bounds of the ranked data points (i.e., 90 % of the model ensembles fall within this range). The middle line is the median estimate of the ensemble.

6.3 Le réchauffement climatique (II): effets sur la végétation actuelle et future

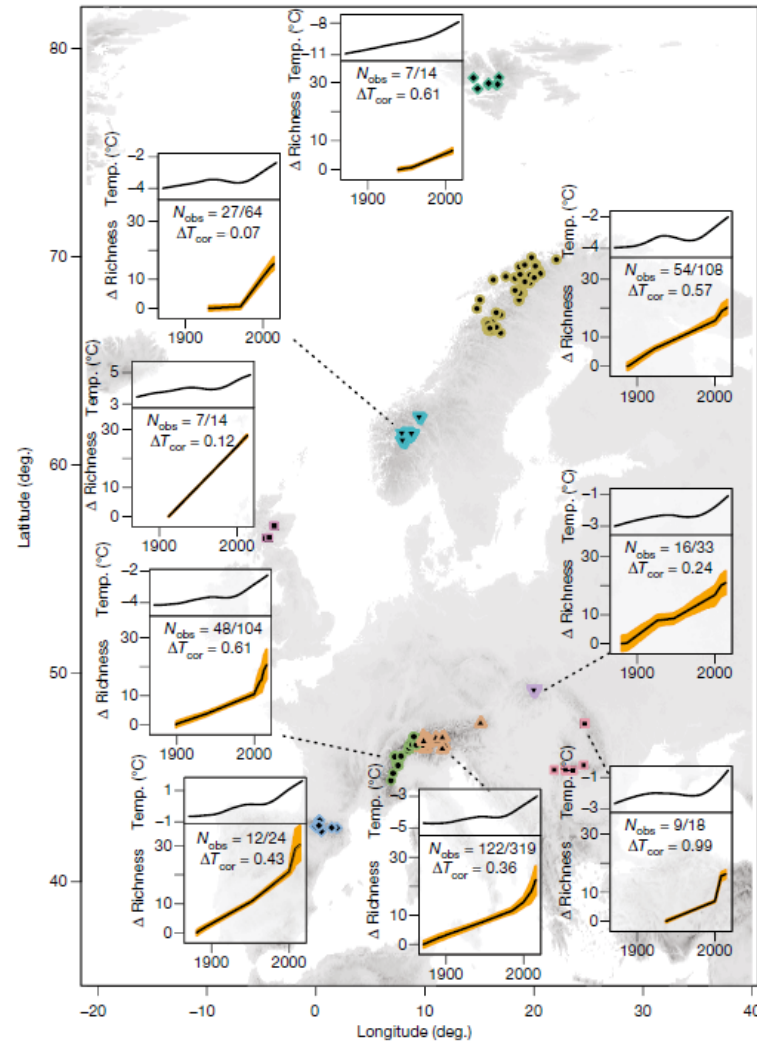


Fig. 2) Average species richness change on mountain summits over time compared to mean annual temperature over time. Upper parts of inset panels, mean annual temperature; lower part, change in species richness (in species numbers). N_{obs} , number of summits/surveys within the mountain region providing data for the panel. Correlation between rate of change in species richness and rate of change in temperature (ΔT_{cor}) is positive for all mountain regions. Orange shading marks the 5th and 95th percentiles of the resulting richness change values from a bootstrapping approach across all summits in one region.

référence:

- Steinbauer et al. (2018). Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. Nature, DOI 10.1038/s41586-018-0005-6
- Huber et al. (2021). Stand-scale climate change impacts on forests over large areas. Ecol Appl. doi: 10.1002/eap.2313.

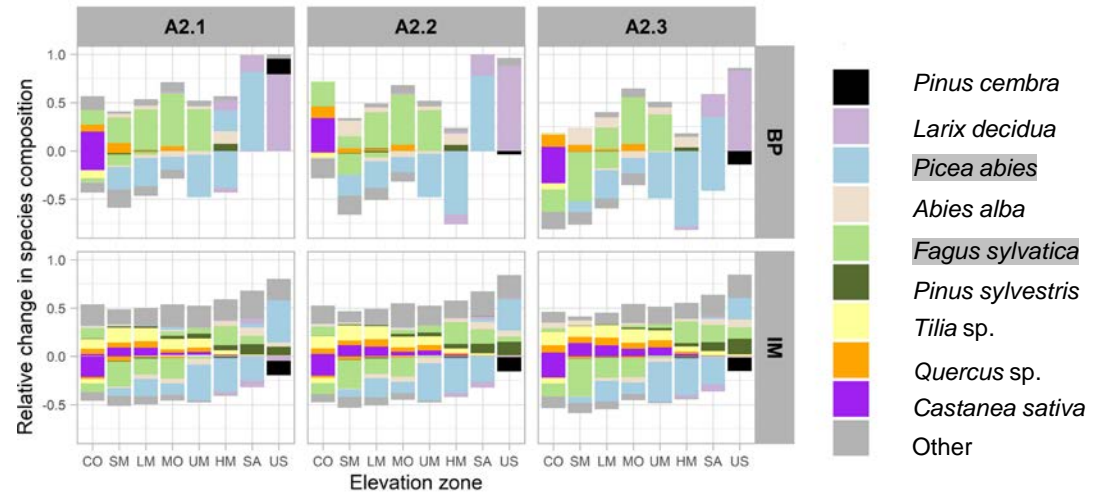


Fig. 5. Species change per elevation zone [see legend Fig. 3] for the three climate change scenarios with respect to the reference species composition (BP). [IM: accounting for species migration]. The reference composition is derived from base species pool simulations under the historic climate of the reference period (RP) 1980–2009. Values > 0 represent an increase in basal area (BA) of the respective species, while values < 0 represent a decrease in BA of the respective species. Note that the same species can show changes in both directions, thus indicating an increase in some strata and a decrease in others within the same elevation zone. Results are shown for rich soils in the year 2200 and model version 22. (...) Values of absolute species BA were averaged across one management interval with the year 2200 representing the central year. (...)

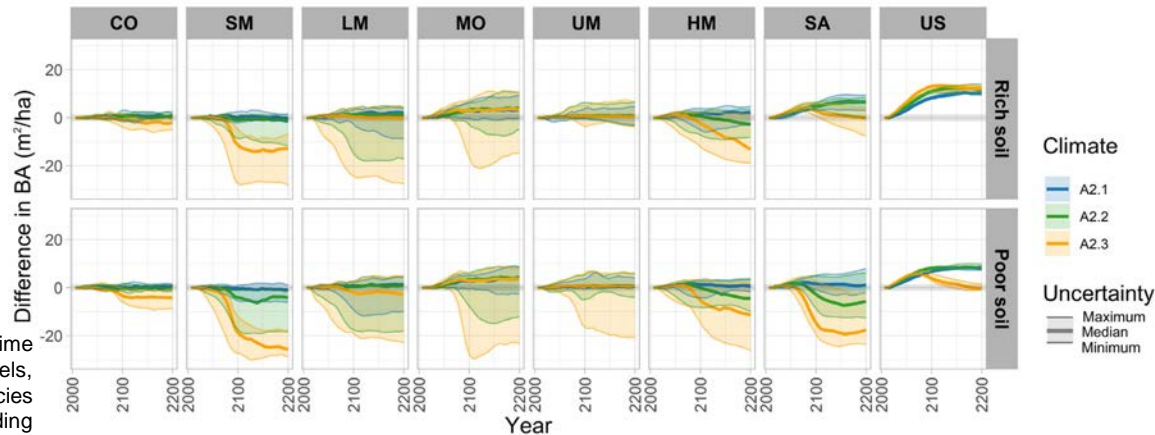


Fig. 3. Absolute differences in basal area (BA) over time for the three climate change scenarios (A2.1–A2.3) with respect to the base species pool simulations under the historic climate of the reference period 1980–2009 [for BP]. (...) For better visualization, a running mean was applied, which corresponded to the management interval. (...) Elevation zones: CO (colline), SM (sub montane), LM (low montane), MO (montane zone of the Southern Pre-Alps), UM (upper montane), HM (high montane), SA (subalpine), US (upper subalpine). (...)

6.3 Le réchauffement climatique (III): vers une disparition de l'épicéa sur le Plateau suisse ?

facteurs prédisposants

xéromorphie
seulement de type
hivernal



enracinement
superficiel



facteurs d'accélération

fortes fructifications



Les Charbonnières/VD, 31.10.2020

facteurs de mortalité



sécheresses

Wettswil/ZH, 07.04.2019



pullulations de bostryches

Hüttikon/ZH, 28.05.2020

essences tolérantes,
par ex. le **pin sylvestre**



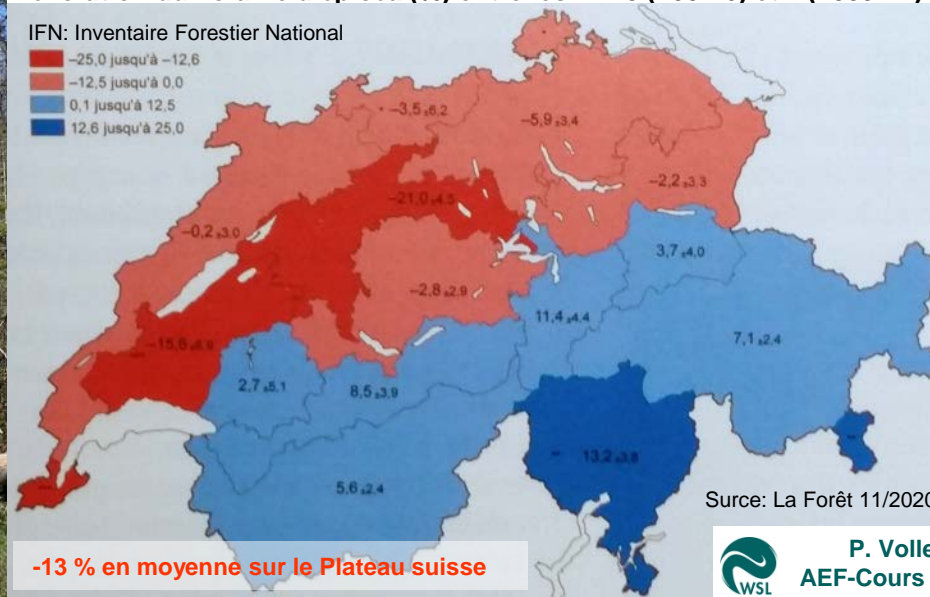
Jonen/AG, 28.04.2021



référence: Kutschera et Lichtenegger (2013).
Wurzelatlas. Leopold Stocker Verlag, Graz.

évolution du volume d'épicéa (%) entre les IFN 3 (2004-6) et 4 (2009-17)

IFN: Inventaire Forestier National



Source: La Forêt 11/2020

-13 % en moyenne sur le Plateau suisse



P. Vollenweider
AEF-Cours 6, page 6/112

6.3 Le réchauffement climatique (IV): aspects mécanistiques des réponses au stress hydrique, parties épigées

- les changements climatiques en cours, en augmentant significativement les contraintes environnementales, constituent la principale menace pour la stabilité des écosystèmes à moyen et long terme. Une augmentation du stress abiotique, notamment hydrique, peut être postulée
- du point-de-vue morphologique ou anatomique, le stress hydrique a différentes conséquences et se manifeste par des symptômes spécifiques et aspécifiques variant selon le niveau d'observation et la périodicité des épisodes de sécheresse.



peuplement

- dépérissement des pinèdes de basse altitude dans les vallées centrales alpines
- dessèchement précoce du feuillage lors d'épisodes de sécheresse

feuillage

chez les angiospermes: développement de gradients acropétales ou basipétales de symptômes, selon l'espèce

- symptômes spécifiques:

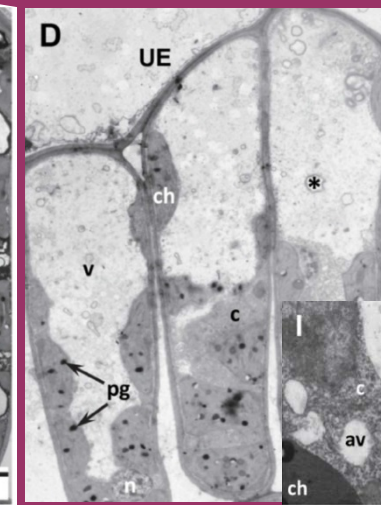
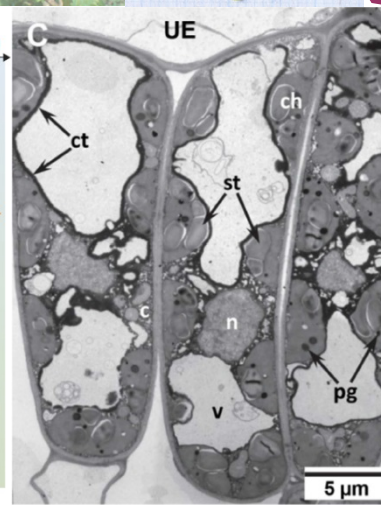
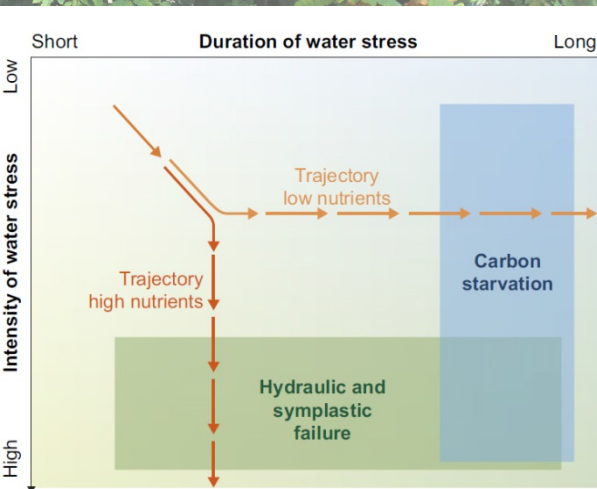
- enroulement
- nécroses latérales

- symptômes aspécifiques: sénescence accélérée du feuillage

altérations structuro-fonctionnelles et mécanismes de tolérance

Au niveau de l'organisme ou de ses parties, de fortes sécheresses entraînent un manque d'eau et d'assimilats. Des facteurs biotiques et nutritionnels peuvent interagir avec ces processus au cours du temps et co-déterminer la nature et l'intensité des réponses observées.

Les marqueurs foliaires dans le feuillage stressé hydriquement (D), en comparaison des contrôles (C), comprennent une diminution de l'amidon (st), une réduction du cytoplasme et des métabolites secondaires (ct) et, en corrolaire, une augmentation de la taille du vacuome (v).



I ces derniers changements résultent d'un accroissement de l'activité autophagique (av), laquelle permet de palier au manque en carbone et de mieux retenir l'eau par diminution du potentiel osmotique (-> stratégie anisohydrique).

=> c'est un mécanisme de tolérance dans les parties encore chlorophylliennes <=

référence:

- Gessler et al. (2017). New Phytologist 214, 513-520.
- Vollenweider et al. (2015). Trees 30, 883-900



6.3 Le réchauffement climatique (V): aspects mécanistiques des réponses au stress hydrique, parties hypogées

altérations morphologiques et structurales

-sécheresses à chronicité périodique:

- fort développement racinaire par allocation préférentielle des assimilats aux racines
- renouvellement rapide des racines fines dès que les conditions redeviennent favorables

-sécheresse aiguë:

- **subérisation de l'endoderme** et du méristème apical
- transformation du cortex en liège protecteur et mort cellulaire
- nécrose de l'apex racinaire et réduction de la biomasse des racines fines

remarque: aucune de ces réactions n'est spécifique au stress hydrique. La plupart des réponses des végétaux supérieurs permettent ainsi une acclimatation, souvent synergique, à une pluralité de contraintes environnementales.

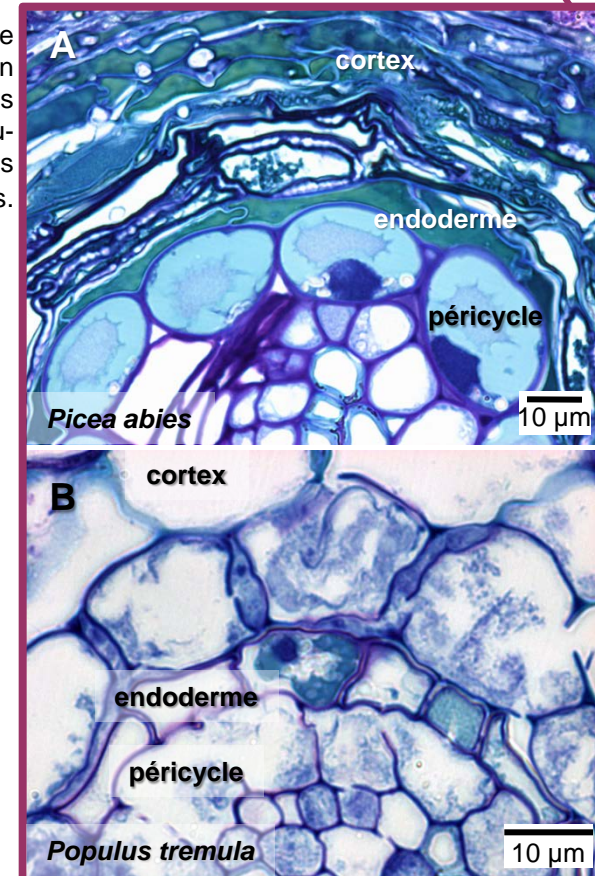
développement de l'embolisme dans le xylème racinaire, en réponse au stress hydrique

renforcement de l'imperméabilisation de l'endoderme par subérisation de la paroi (non colorée) et accumulation de métabolites secondaires vacuolaires (bleu-vert ou bleu-turquoise, dans la zone absorbante de racines d'épicéas (A) et de peuplier (B) mycorrhizées.

Fig. 2 | (...) b, Three-dimensional rendering [of embolism within xylem] from a X-ray micro-computed tomograph of a pine stem. Embolized tracheids can be seen clearly as a black void space surrounded by water-filled (grey) tracheids. c, Part of a root system rendered from a micro-computed tomograph showing embolized xylem vessels (red) in the main root axis and lateral roots during dehydration. Right, the root tissue has been made transparent to illustrate the pathway of embolized vessels (...).

référence:

- Polomski et Kuhn (1998). Wurzelsysteme. Haupt Verlag, Bern.
- Choat et al. (2018) Nature 558, 531-539



6.3 Références (I)

Principaux ouvrages et articles de référence utilisés:

Chapitre 6.1

Hartmann, G., Nienhaus, F., Butin, H., 2007. Farbatlas Waldschäden. 3. Auflage. Diagnose von Baumkrankheiten. 3. Auflage. Eugen Ulmer KG, Stuttgart.

Vollenweider, P., Günthardt-Goerg, M.S., 2006. Diagnosis of abiotic and biotic stress factors using the visible symptoms in foliage. *Environmental Pollution* 140, 562-571.

Chapitre 6.2

Eschrich, W., Fromm, J., Essiamah, S., 1988. Mineral partitioning in the phloem during autumn senescence of beech leaves. *Trees Structure and Function* 2, 73-83.

Kivimäenpää, M., Sutinen, S., 2007. Microscopic structure of Scots pine (*Pinus sylvestris* (L.)) needles. *Trees Structure and Function* 21, 645-659.

during ageing and autumnal senescence

Mikkelsen, T., Heide-Jorgensen, N., Henning, S., 1996. Acceleration of leaf senescence in *Fagus sylvatica* L. by low levels of tropospheric ozone demonstrated by leaf colour, chlorophyll fluorescence and chloroplast ultrastructure. *Trees Structure and Function* 10, 145-156.

Schaberg, P.G., Van den Berg, A.K., Murakami, P.F., Shane, J.B., Donnelly, J.R. 2003. Factors influencing red expression in autumn foliage of sugar maple trees. *Tree Physiology* 23, 325–333.

6.3 Références (II)

Principaux ouvrages et articles de référence utilisés:

Chapitre 6.3

Académie suisse des sciences naturelles , 2016. Coup de projecteur sur le climat suisse. État des lieux et perspectives. Swiss Academics Reports 11 (5)

Beniston, M., 2009. Changements climatiques et impacts. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 247 pp.

CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0CH2011(<https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/scenarios-climatiques-suisse/rapport-technique.html/>).

Choat, B., Brodribb, T.J., Brodersen, C.R., Duursma, R.A., López, R., Medlyn, B., (2018) Triggers of tree mortality under drought. Nature 558, 531-539.

E.Cosio, C., Vollenweider, P., Keller, C., 2006. Localization and effects of cadmium in leaves of tolerant willows (*Salix viminalis* L.). Part I. Macrolocalization and phytotoxic effects of cadmium. Environmental and Experimental Botany 58, 64-74.

Fink, S. 1999. Pathological and regenerative plant anatomy. Encyclopedia of plant anatomy Vol. XIV/6, Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart.

Gessler, A., Schaub, M., McDowell, N. G., 2017. The role of nutrients in drought-induced tree mortality and recovery. New Phytologist, 214, 513-520.

Günthardt-Goerg, M.S., Vollenweider, P., 2007. Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees: New diagnostic perspectives. Environmental Pollution 147, 467-488.

Garthwaite, R., Fowler, D., Stevenson, D., Cox, P., Ashmore, M., Grennfelt, P., Amann, M., Anderson, R., Depledge, M., Derwent, D., Hewitt, N., Hov, O., Jenkin, M., Kelly, F., Liss, P., Pilling, M., Pyle, J., Slingo, J., 2009. Ground level ozone in the 21st century: Trends, interactions with climate and environmental impacts. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 6, Issue 28, pp. 282002, 3 pp. DOI: 10.1088/1755-1307/6/28/282002

Huber, N., Bugmann, H., Cailleret, M., Bircher, N., Lafond, V., 2021. Stand-scale climate change impacts on forests over large areas: transient responses and projection uncertainties. Ecol Appl. 31(4):e02313. doi: 10.1002/eap.2313. Epub 2021 May 5. PMID: 33630399; PMCID: PMC8243936.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kutschera, L., Lichtenegger, E., 2013. Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. 2. Auflage. Leopold Sctocker Verlag, Graz - Stuttgart

OFEV et al., 2020 : Changements climatiques en Suisse. Indicateurs des causes, des effets et des mesures. État de l'environnement n° 2013 : 109 p.(<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/changements-climatiques-suisse.html>)

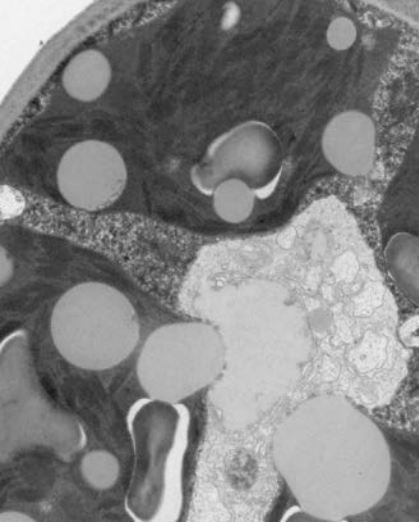
OFEV (éd.) 2020: Immissions excessives de dépôts azotés et d'immissions d'ammoniac. Évaluation sur la base des charges et niveaux critiques en relation avec l'élaboration des plans de mesures cantonaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 2003: 23 p. (www.bafu.admin.ch/uv-2003-f)

Polomski, J., Kuhn, N., 1998. Wurzelsysteme. Paul Haupt Verlag, Bern

Siedlecka, A., 1995. Some aspects of interactions between heavy metals and plant mineral nutrients. Acta Societatis Botanicorum Poloniae 64, 265-272.

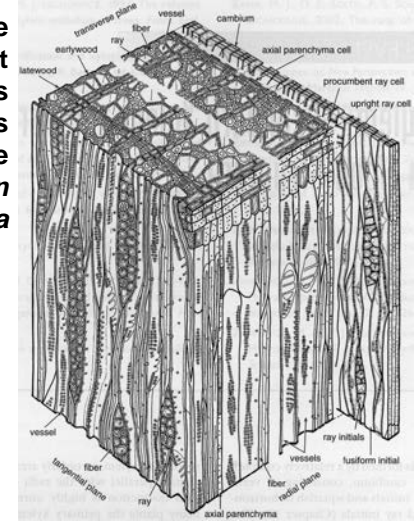
Steinbauer, M. J., Grytnes, J. -A., Jurasinski, G., Kulonen, A., Lenoir, J., Pauli, H., ... Wipf, S. 2018. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. Nature, 19 pp. <http://doi.org/10.1038/s41586-018-0005-6>

Vollenweider, P., Menard, T., Arend, M., Kuster, T.M., Günthardt-Goerg, M.S., 2015. Structural changes associated with drought stress symptoms in foliage of Central European oaks. Trees, DOI 10.1007/s00468-015-1329-6



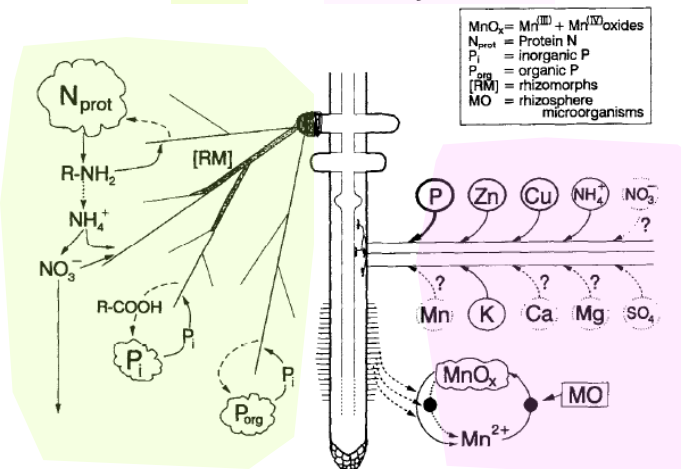
Excrétion de plastoglobules dans une cellule de mésophile foliaire chez le hêtre

Bloc diagramme représentant l'agencement des cellules et des tissus dans le bois de *Liriodendron tulipifera*



7. CONCLUSION, TABLE DES MATIÈRES ET GLOSSAIRE DES ESPÈCES

Dynamique nutritionnelle dans les plantes avec des ecto- et des endomycorhizes



Querco: une expérimentation du WSL sur les effets des changements climatiques



7. Quelques conclusions

- Les cellules végétales montrent une grande diversité structurale en fonction de leur stade de développement ontologique, de leur spécialisation fonctionnelle et de leur état physiologique et reflètent l'effet des conditions environnementales jusque dans leur ultrastructure (=> **Chapitre 2**).
- Dans les végétaux supérieurs, la différenciation cellulaire et l'organisation des cellules en tissus permettent l'adaptation des nouveaux organes aux contraintes environnementales prédominantes (=> **Chapitre 3**).
- Quelque soit le biome terrestre envisagé, l'organisation des apex racinaires, où se concentrent les activités de croissance, d'absorption et de ramification, présentent une homogénéité structurale remarquable pour l'ensemble des plantes vasculaires, qui fait contraste avec l'infinité des structures observées dans les organes épigés (=> **Chapitre 4**).
- Les caractéristiques structurales apparues au cours de l'évolution et propres à chaque espèce jouent un rôle déterminant concernant la niche écologique colonisable et la capacité d'adaptation à des conditions concurrentielles d'accès à la lumière, à l'eau et aux nutriments (=> **Chapitre 5.1**).
- Les variations cycliques des conditions écologiques liées aux rythmes circadiens ou annuels ont des répercussions de la cellule à l'organe végétal. L'état structural est ainsi essentiellement dynamique et dépend de l'activité physiologique de la plante, en phase avec les conditions environnementales (=> **Chapitre 5.2**).
- Les contraintes environnementales influencent l'accroissement des structures pérennes. On observe des hiérarchies de facteurs environnementaux, avec le climat comme facteur principal en l'absence de perturbation (=> **Chapitre 5.2**).
- Une augmentation ou l'apparition de nouvelles contraintes est à l'origine du stress environnemental et se traduit par l'apparition de symptômes visibles. La distribution et la morphologie de ces symptômes est indicatrice du stress subi et permet de diagnostiquer le facteur qui en est à l'origine (=> **Chapitre 6**).
- La réponse et l'adaptation des écosystèmes terrestres aux changements climatiques en cours incluent aussi des dimensions écophysiologiques et fonctionnelles (=> **Chapitre 6.3**).

⇒ La compréhension fonctionnelle des végétaux supérieurs ouvre la porte à celle des interactions plante-environnement ⇐

7. Tables des matières

Chapitre	Documents
1. Introduction générale.	1-8
2. La cellule végétale dans son contexte environnemental.	9-26
3. Les tissus végétaux: un échelon fondamental de l'adaptation à l'environnement.	27-56
4. La racine: de la cellule aux interactions plante-sol.	57-71
5. Écologie et structure:	
5.1 Structure anatomique et potentiel écologique.	72-81
5.2 Changements structuraux en réponse aux contraintes environnementales.	82-89
6. Stress environnemental et réactions structurales:	
6.1 Les symptômes visibles: des changements structuraux détectables à l'œil nu.	90-93
6.2 La sénescence et ses conséquences au niveau structural.	94-97
6.3 Bioindication de facteurs de stress biotique et abiotique avec des marqueurs structuraux.	98-116
7. Conclusions, Table des Matières et Glossaire des espèces.	117-121

7. Glossaire des espèces illustrées dans le cours AF

Glossaire des espèces avec illustration de la morpho-anatomie fonctionnelle

Nom latin	Nom français	Feuillage	Tige	Racine
<i>Abies alba</i>	sapin pectiné			4/68, 4/70
<i>Abies balsamea</i>	sapin baumier		5/84,	
<i>Acer sp.</i>	érable	6/94, TP3	5/84, TP2	
<i>Agrostis stolonifera</i>	Agrostis à stolons			4/65
<i>Ailanthus altissima</i>	Ailante glanduleux		5/77	
<i>Allium cepa</i>	oignon			4/61
<i>Alnus glutinosa</i>	aulne glutineux		TP2	4/68, 4/69
<i>Armeria maritima</i>	armérie maritime	3/46		
<i>Artemisia campestris</i>	armoïse champêtre			4/67
<i>Arthrocnemum sp.</i>	Salicorne	6/96		
<i>Bambusoideae</i>	bambou		3/33	
<i>Betula sp.</i>	bouleau		3/45	4/68, 4/69
<i>Carex pendula</i>	laîche pendante	2/23		
<i>Carpinus betulus</i>	charme			4/68
<i>Celastrus scandens</i>	bourreau des arbres		5/84	
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	cyprès du Japon		3/48	
<i>Chlorophytum comosum</i>	plante vaudoise	TP1	TP1	TP1
<i>Clematis vitalba</i>	clématite des haies		5/74	
<i>Coleus blumei</i>	plectranthe fausse-scutellaire	2/19		
<i>Commelina communis</i>	commeline commune	2/17		
<i>Corynephorus canescens</i>	corynéphore argenté			4/67
<i>Cucurbita sp.</i>	courge		3/52	
<i>Cynodon dactylon</i>	chiendent pied de poule	3/46		
<i>Cyperus zumula</i>	herbe à chats	TP1	TP1	TP1
<i>Daucus carota</i>	carotte			4/61
<i>Drosera anglica</i>	rossolis à longues feuilles	2/20		
<i>Erodium cicutarium</i>	Bec-de-grue commun			4/67
<i>Erophila verna</i>	drave printanière			4/67
<i>Fagus grandifolia</i>	hêtre à grandes feuilles		3/45, 5/77	
<i>Fagus silvatica</i>	hêtre	2/10, 2/23, 3/32, 3/35, 3/40, 6/95, 6/97, 6/107, TP4	5/76, 5/84, 6/95, TP2	4/68, 4/70
<i>Festuca ovina</i>	fétuque des moutons	3/42		
<i>Fraxinus excelsior</i>	frêne commun		5/84, TP2	
<i>Glechoma hederacea</i>	lierre terrestre		3/31	
<i>Holosteum umbellatum</i>	holostée en ombelle			4/67
<i>Hordeum vulgare</i>	orge			4/66
<i>koeleria glauca</i>	koélerie glauque			4/67
<i>Lactuca sativa</i>	salade pommée			4/61
<i>Lactuca scariola</i>	laitue sauvage		3/48	
<i>Larix decidua</i>	mélèze		5/85	4/68
<i>Larix laricina</i>	mélèze laricin		5/84	
<i>Laurus nobilis</i>	laurier noble		3/34	
<i>Lippia graveolens</i>	origan du Mexique	3/47		
<i>Liriodendron tulipifera</i>	tulipier		3/55, 5/77,	
<i>Lycopersicon esculentum</i>	tomate			4/61
<i>Malus sylvestris</i>	pommier		5/84	



Glossaire des espèces.xlsx
Microsoft Excel Worksheet
14.8 KB

7. « Take home message »: Observez les changements en cours autour de vous!

épicéas décimés par le bostryche

décoloration des houpiers de hêtres par l'ozone

mortalité dans les cimes des frênes par la chalarose