

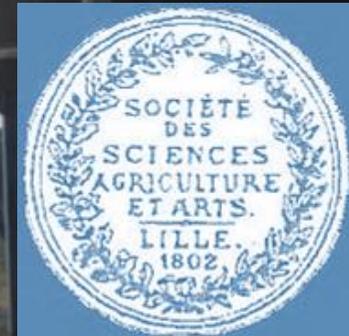
Végétaux et métaux lourds

Métaux lourds: éléments chimiques dont la densité est $> 5 \text{ g/cm}^3$ (66 dans la classification périodique des éléments)

Éléments traces : éléments de la croûte terrestre dont la **concentration est $< 0,1\%$** (80 éléments = 0,6% du total)

≠ **éléments majeurs** (12 éléments = 99,4%)

Eléments Traces Métalliques (ETM) Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn,...



Origine des métaux lourds présents dans notre environnement

Roches-mères, Retombées volcaniques, érosion

Roches métallifères à l'affleurement

EX. Serpentine, Calamine (La Calamine), Plombière (B), Harz (D),

Activités humaines

Exploitations minières, industries métallurgiques (Auby, Courcelles, Mortagne-du-Nord), boues résiduelles, déchèteries, armes (chasse, ...), agriculture...

Les métaux lourds dans les sols

- très répandus à la surface du globe mais **le plus souvent à très faible concentration**, Baize (2009) distingue :
 - Fond géochimique** : teneurs apportées par la roche et son histoire
 - Fond pédogéochimique naturel** : teneurs modifiées par le fonctionnement d'un sol
 - Teneurs agricoles habituelles** : effets des pratiques agricoles
- Certains sont des **éléments essentiels** (Oligo-éléments)
Fe, Zn, Ni, Cu, Mg, Mn, Mo, ... Indispensables pour le déroulement des processus moléculaires au sein des cellules (co-facteurs d'enzymes, biocatalyseurs, constituants de molécules comme la chlorophylle,....)
- D'autres n'ont pas de fonction biologique connue (Cd, Pb, Hg, Sn,...)

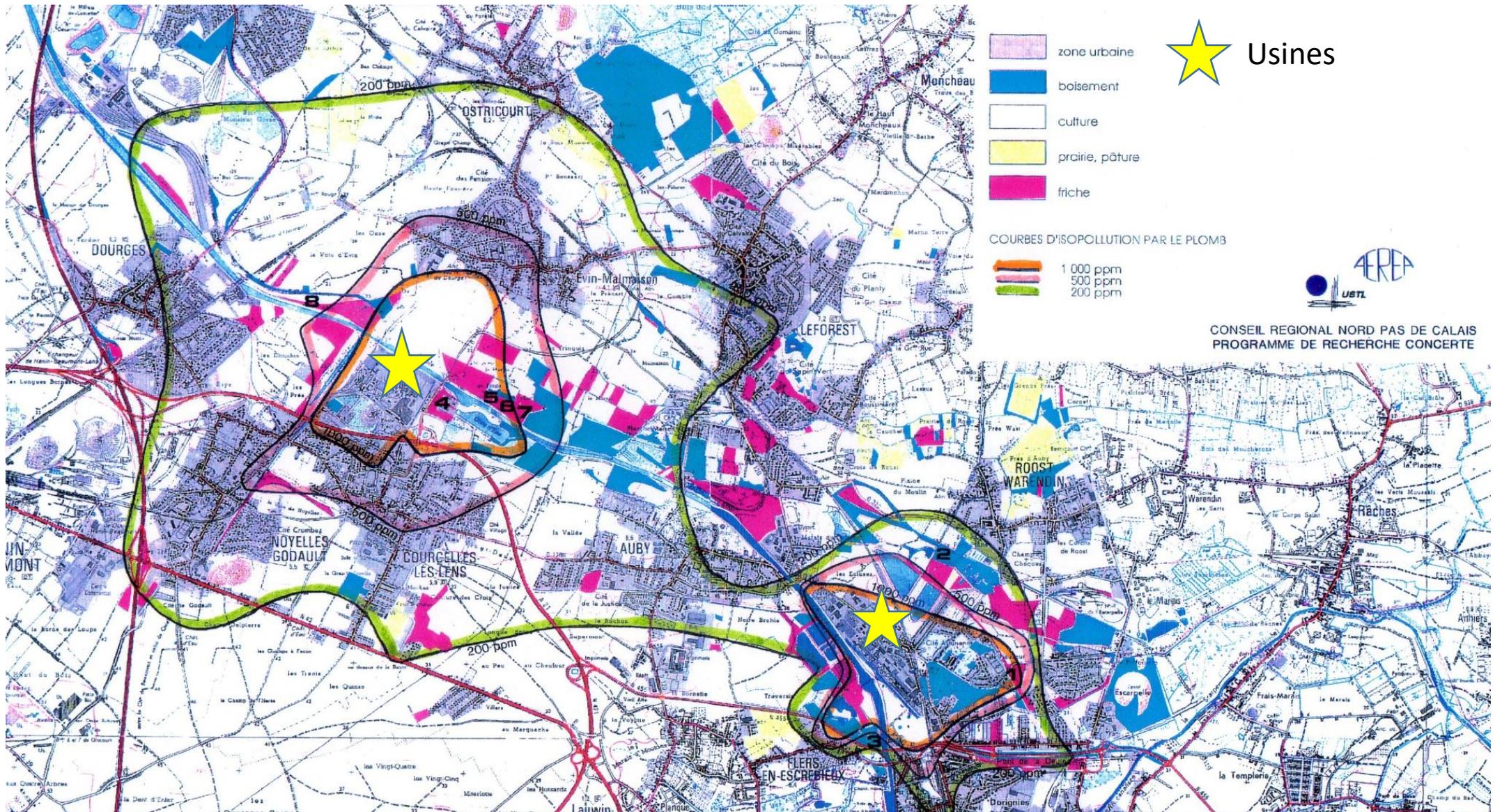
La toxicité des métaux lourds

Quand la concentration dépasse un certain seuil, les métaux lourds sont toxiques pour le vivant.

Cette toxicité dépend :

- de la **concentration** dans le sol
- de la **biodisponibilité** = aptitude à être transféré (de façon passive ou active) d'un compartiment du sol vers un organisme vivant

Teneurs Extractibles (Acétate d'ammonium, EDTA) (mg/kg)	cd	Pb	Zn
Sols cultivés argilo-calcaires	0,5-1,6	24-42	12-184
Sols pollués	85	1500	6000
Seuils normes NF U44 O41	2	100	300



Pollutions et occupation des sols autour des usines de Auby et Courcelles-lès-Lens (1998)



Zn	Pb	Cd
13858	3096	246
12438	3698	85
1875	128	16

Zn	Pb	Cd
11092	2297	129
8413	4809	117
2058	184	35

Horizon organique épais et non décomposé en surface du sol riche en métaux

Zn	Pb	Cd
4717	972	72
4425	1014	69
1683	379	21

Les teneurs en Zn, Pb et Cd du sol dans le bois des Asturies à Aubry

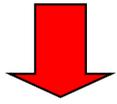


Pelouse métallicole avec *Viola calaminaria*, *Arabidopsis halleri* et *Armeria halleri*

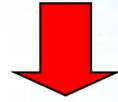


Pelouse métallicole du parc Péro à Aubry dominée ici par *Armeria halleri*, *Agrostis capillaris* avec présence de fromental (*Arrhenatherum elatius*)

Populations végétales et teneurs métalliques élevées



Pénétration dans les végétaux, intoxication et...mort



Forte diminution de la Biodiversité
Pression de sélection forte sur les végétaux



Arrivée possible de métalophytes depuis les sites d'extraction des minerais



Sélection au sein des populations locales, d'individus les plus performants
Apparition de la TOLERANCE

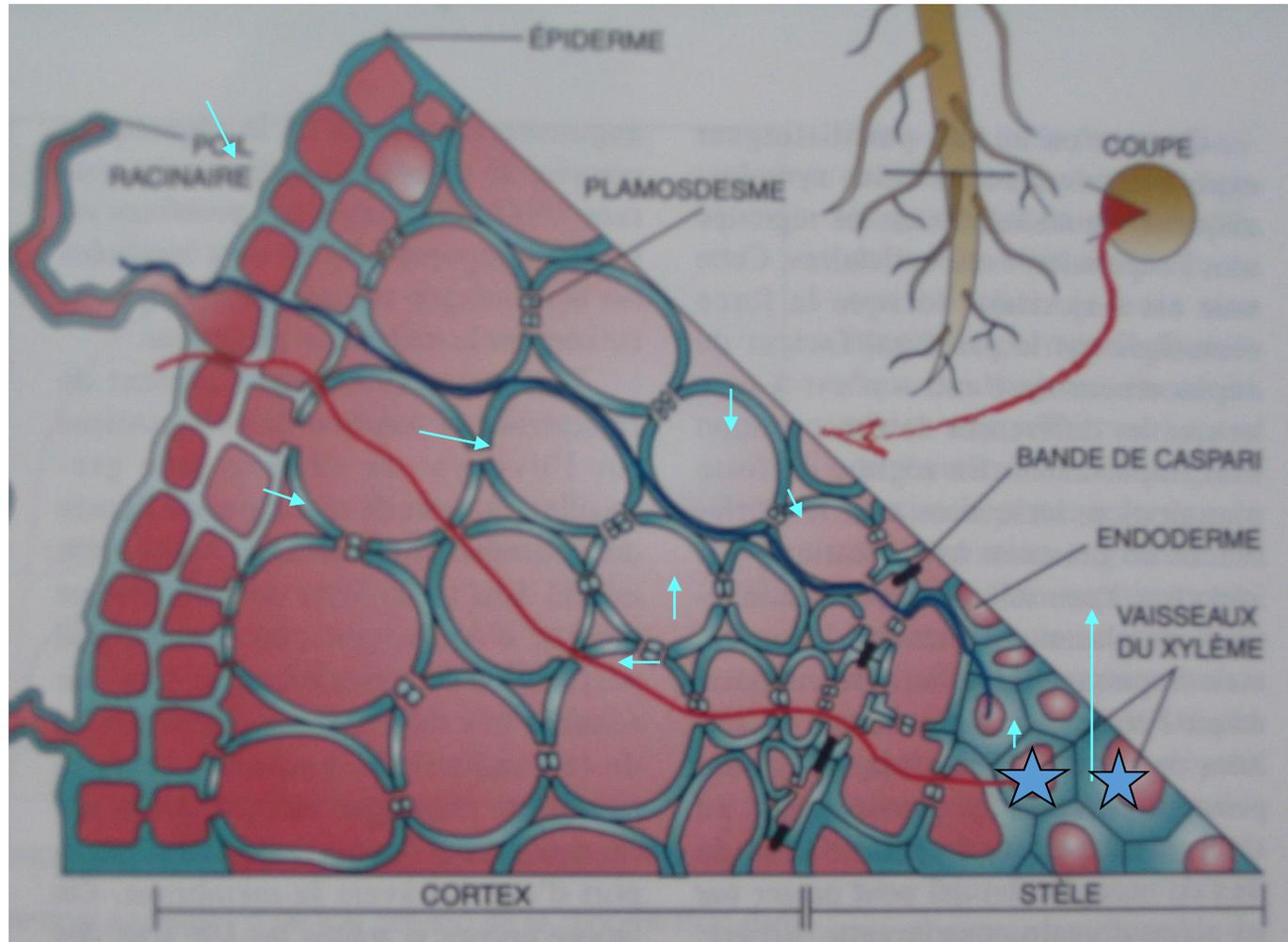


Les métaux pénètrent dans la plante

Chez les plantes sensibles on note :

- Arrêt de la croissance racinaire et de la partie aérienne
- Perturbation de la circulation apoplastique et des échanges membranaires
- Perturbation du métabolisme hydrique et minéral (Stomates, ABA, Ca^{++} , K^{+} ...)
- Perturbation des structures cellulaires et du fonctionnement des organites cellulaires (photosynthèse, divisions cellulaires, stress oxydatif ,...)
- Les feuilles deviennent chlorotiques

↓
Mort



Cependant,
des plantes « **locales, ordinaires** » se développent sur des sols
fortement enrichis en métaux

Elles ont donc des aptitudes qui leur permettent de contrecarrer les
effets négatifs des fortes teneurs en métaux

Ces espèces sont **tolérantes**

*“ La tolérance aux métaux est la capacité d'une espèce, d'une population ou d'un individu à se **développer** et à se **reproduire** sur des sols contaminés par des métaux, à des **concentrations toxiques** pour la **plupart des espèces** ”* (Macnair, 1987)

on les qualifie aussi de **métallophytes**

Tests de germinations sur Cu de 20000 graines/espèce jusqu'au stade adulte (Ingram 1998)

Espèces	% d'individus tolérants dans les pop. normales	Présence (+) ou absence (-) de pop. tolérantes sur mines de Cu
<i>Holcus lanatus</i>	0.16	+
<i>Agrostis capillaris</i>	0.13	+
<i>Festuca ovina</i>	0.07	-
<i>Dactylis glomerata</i>	0.05	+
<i>Deschampsia caespitosa</i>	0.03	+
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	0.02	-
<i>Festuca rubra</i>	0.01	+
<i>Lolium perenne</i>	0.005	-
<i>Poa pratensis</i>	0	-
<i>Poa trivialis</i>	0	-
<i>Phleum pratense</i>	0	-
<i>Cynosurus cristatus</i>	0	-
<i>Alopecurus pratensis</i>	0	-
<i>Bromus spp.</i>	0	-
<i>Arrhenatherum elatius</i>	0	-

Analyse de la tolérance : des tests de croissance racinaire ont permis d'avancer dans la connaissance du phénomène

Les premières études sur la tolérance

Prat 1934

Bradshaw 1952

Wilkins 1959 Test de tolérance =

Accroissement racinaire en milieu normal

Accroissement racinaire en milieu pollué

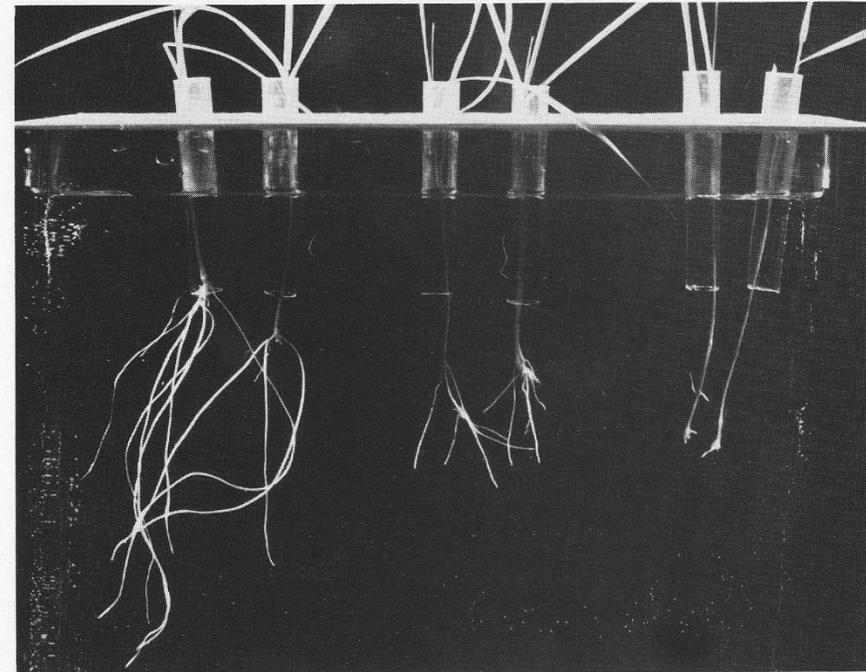
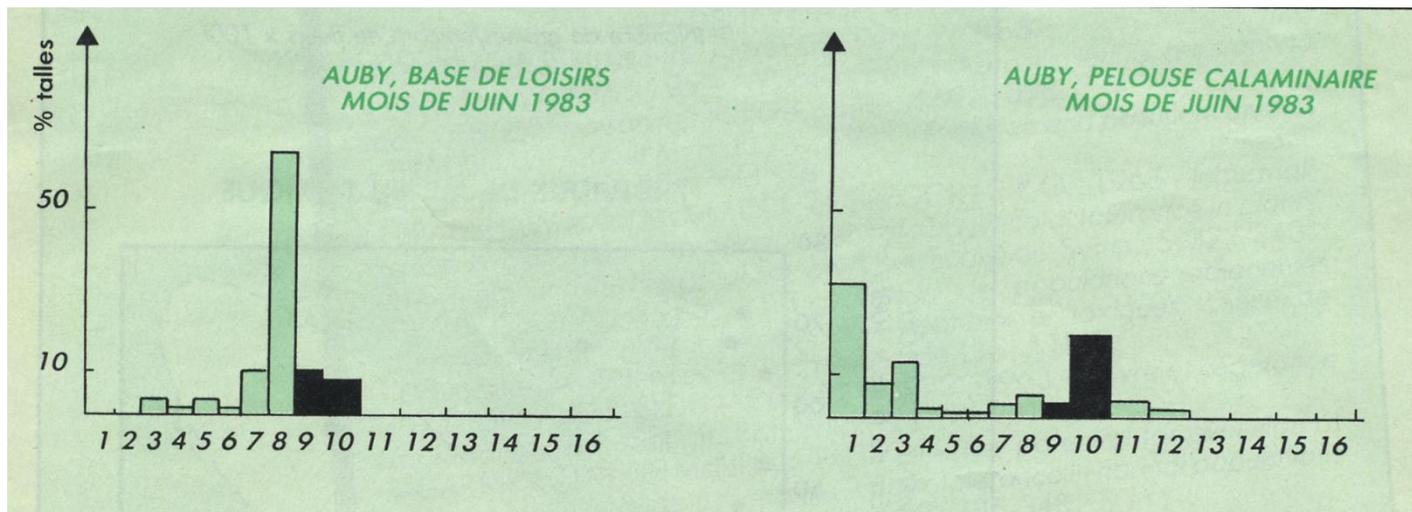


Fig. 3. Root growth of *Agrostis tenuis* in different toxic metals (from population I of Trelogan). 1. Normal solution $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0.5 g/l. 2. Normal solution $\text{Ca}(\text{N}_3)_2$ 0.5 g/l + 3.75 ppm Zn. 3. Normal solution $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0.5 g/l + 0.25 ppm Cu

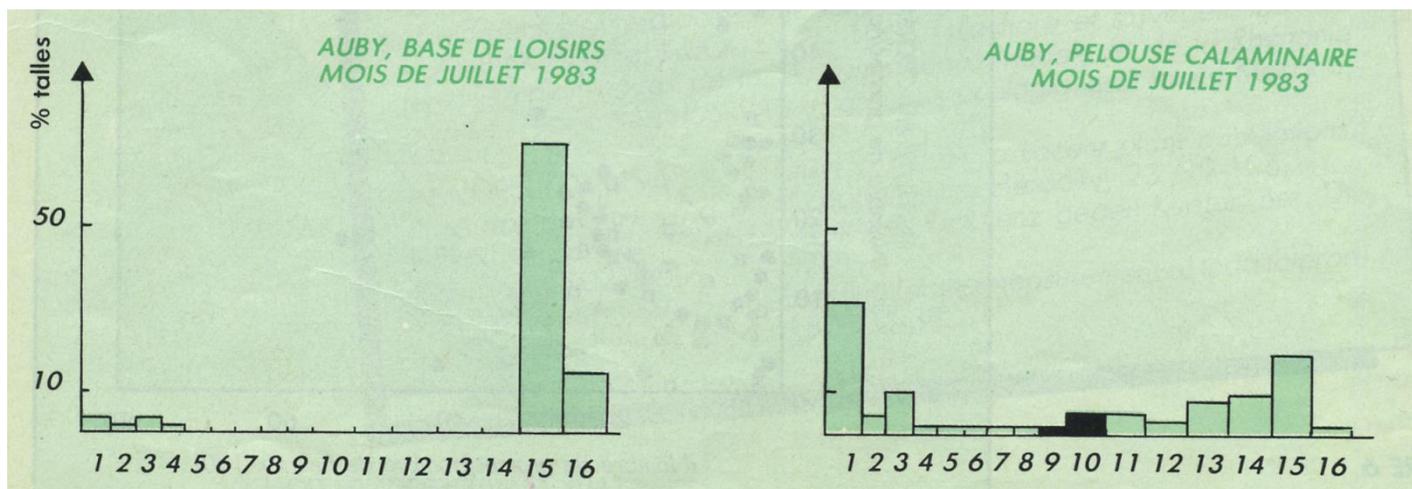
Les caractères de la tolérance

- La tolérance n'est pas un phénomène du tout ou rien
- La tolérance à un métal ne confère pas généralement la tolérance à un autre métal
- La tolérance apparaît rapidement
- Son intensité est fonction de la teneur en métaux et de la durée d'exposition
- La tolérance est héritable

L'évolution « en marche » dans les populations de Fromental (*Arrhenatherum elatius*) à Auby



Les stades phénologiques et leur suivi (en noir: la floraison)

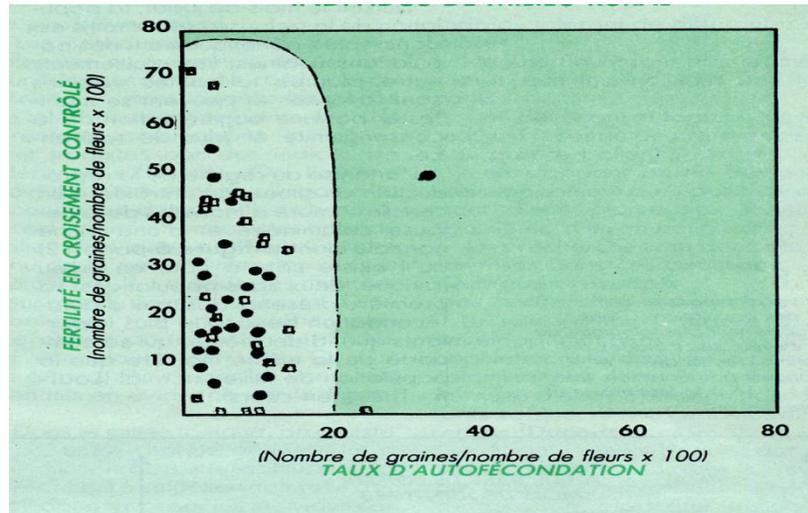


Croisements contrôlés et autofécondations d'individus de Fromental provenant de milieu normal et de milieu toxique

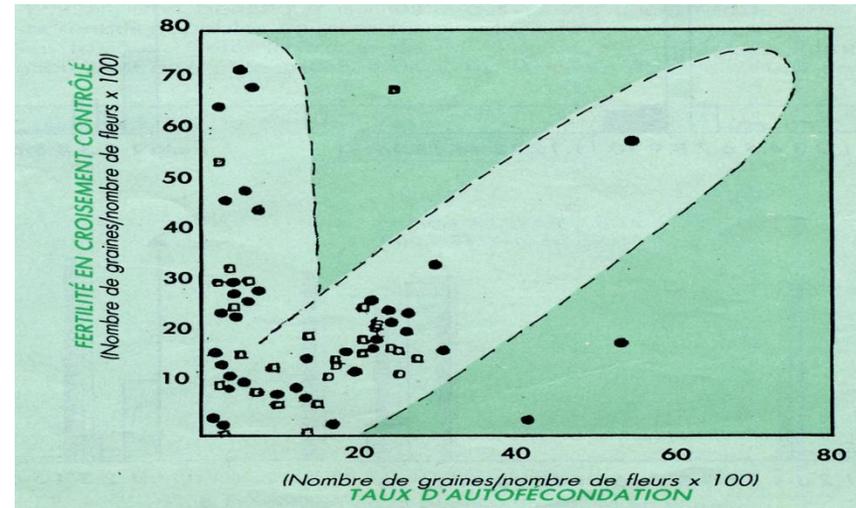


L'évolution « en marche » dans les populations de Fromental (*Arrhenatherum elatius*) à Auby

Individus de milieu normal

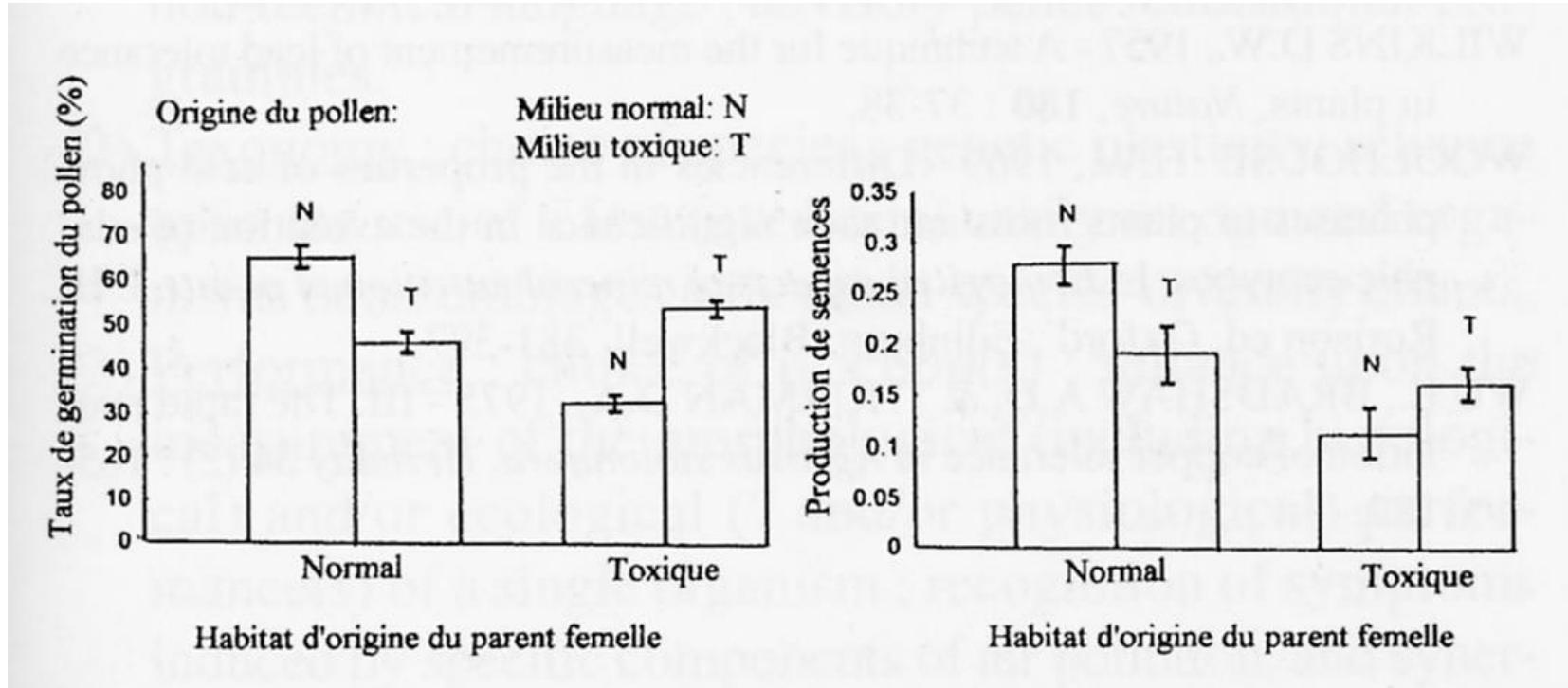


Individus de milieu toxique



Le régime de reproduction: sélection de l'autogamie

L'évolution « en marche » dans les populations de Fromental (*Arrhenatherum elatius*) à Auby



La reconnaissance pollinique

Ce mécanisme évolutif décrit pour les populations de Fromental a pu se réaliser à travers le monde sur tous les sites enrichis en métaux et aboutir pour certaines espèces à une véritable spécialisation : le **métallophytisme**

On distingue

Métallophytes absolues (*ex : Viola calaminaria, Armeria halleri*)

Métallophytes absolues locales (*ex : Arabidopsis halleri*)

Pseudométallophytes (*ex : Arrhenatherum elatius*)

Certaines de ces métallophytes ont été introduites dans notre région en même temps que les minerais

Les métallobytes absolues



Viola calaminaria

Les métallobytes absolues

Armeria halleri

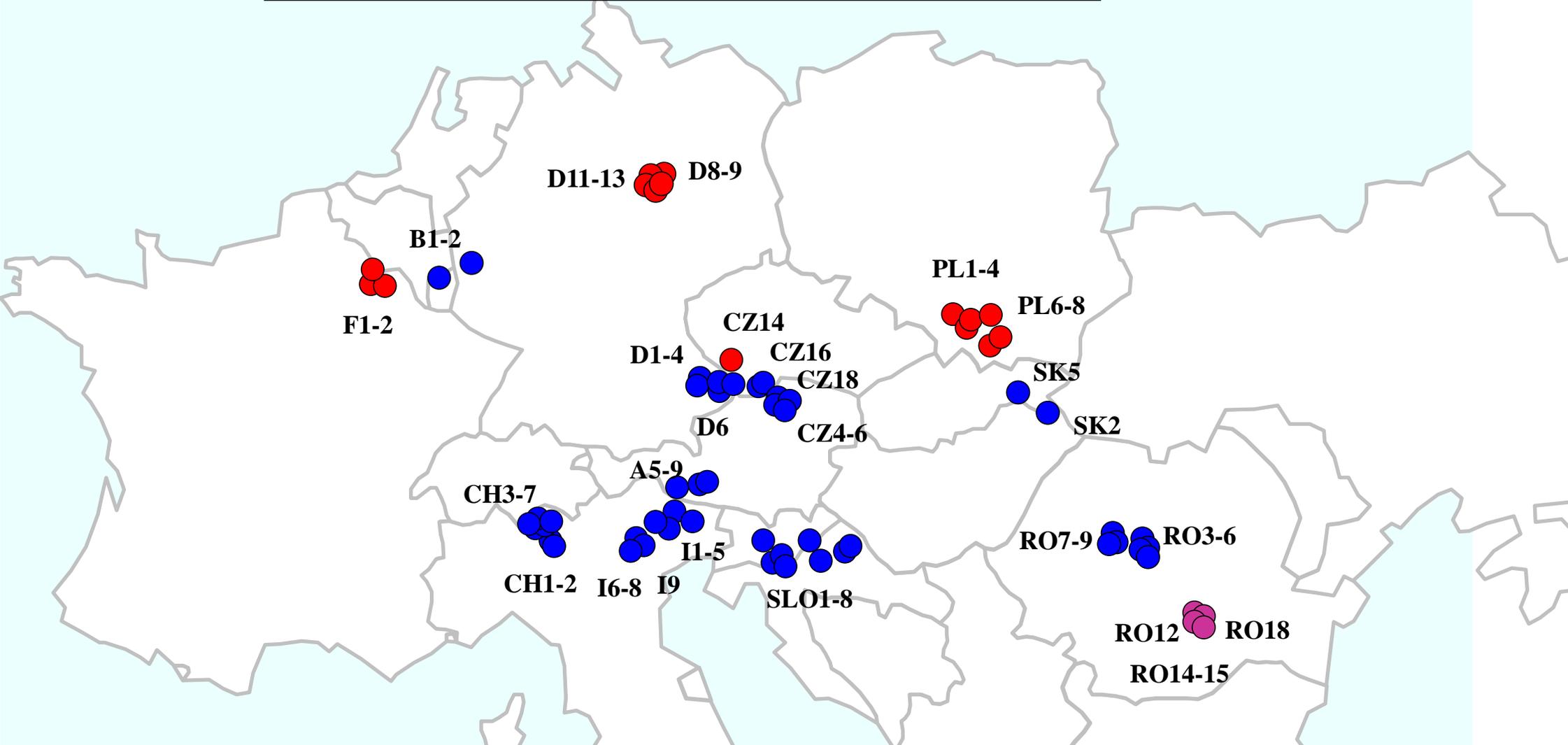


Les métallobytes absolues locales

Arabidopsis halleri

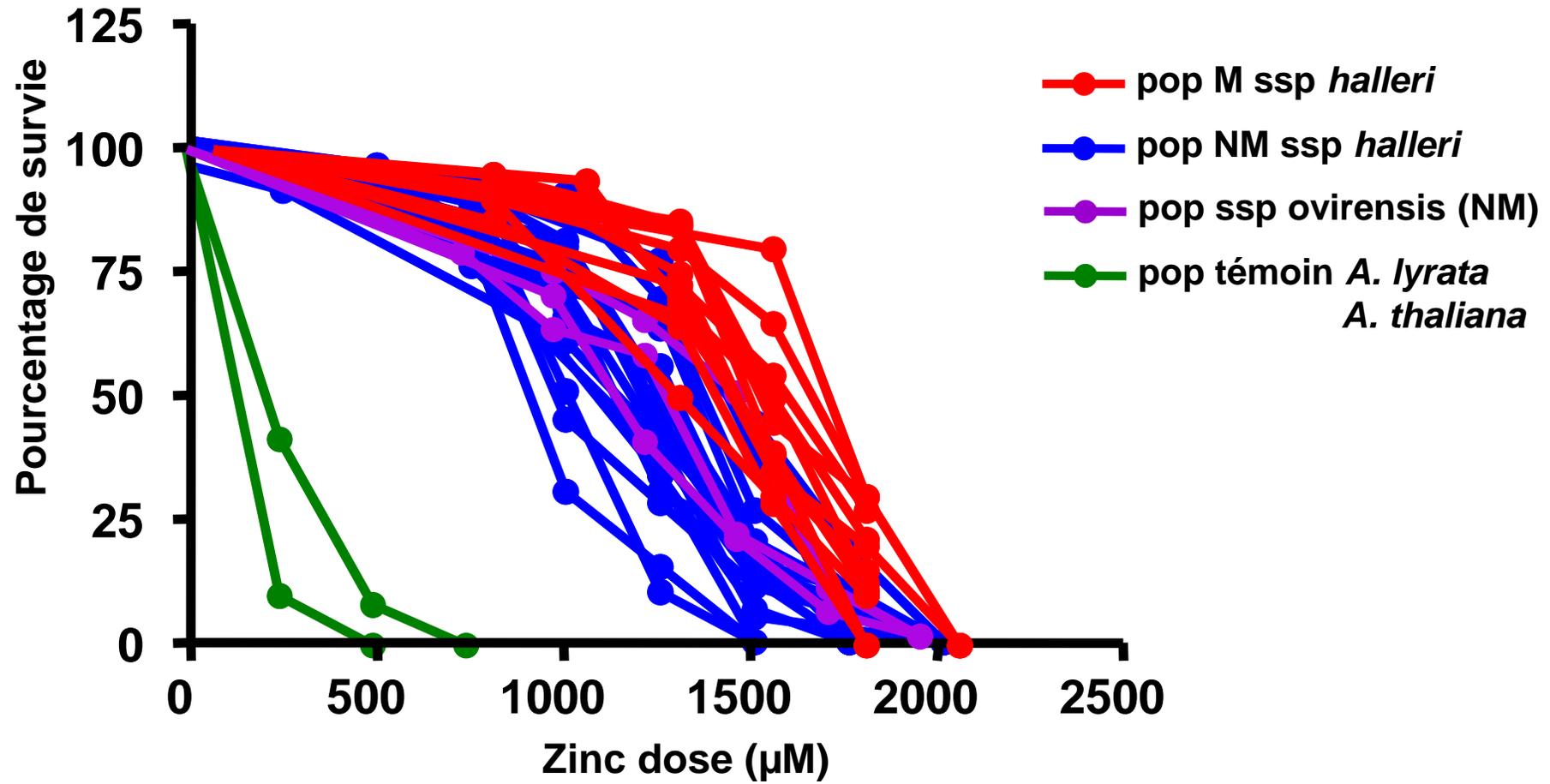
Cette métallobyte est depuis quelques années l'espèce modèle étudiée par une des équipes du Laboratoire de Génétique et Évolution des Populations Végétales (GEPV) UMR CNRS 8016 Université de Lille1 (P. SAUMITOU-LAPRADE, V. BERT, M. PAUWELS,....)

Echantillonnage de l'espèce *A. halleri* en Europe



- pop *A. h. halleri* métallicole
- pop *A. h. halleri* non métallicole
- pop *A. h. ovirensis* non métallicole

Courbes de survie par populations



Les stratégies de réponse des métalphytes face aux métaux du sol

1. Le métal n'entre pas dans la plante

→ mécanisme externe: exsudation racinaire de composés organiques chélatants (acides organiques)

2. Le métal entre dans la plante

- **Plantes résistantes** $[\text{parties aériennes}]/[\text{sol}] < 1$

mécanisme interne d'exclusion : Immobilisation et stockage dans les racines (vacuoles) Mais $>$ seuil!: intoxication

- **Plantes indicatrices** $[\text{parties aériennes}]/[\text{sol}] = 1$

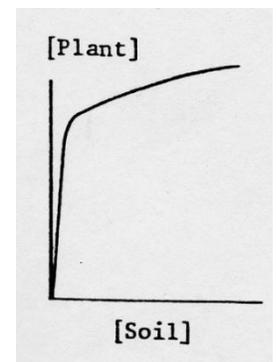
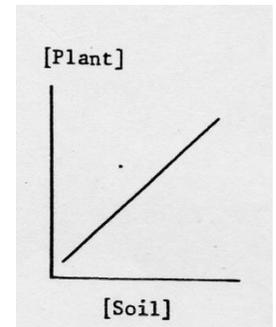
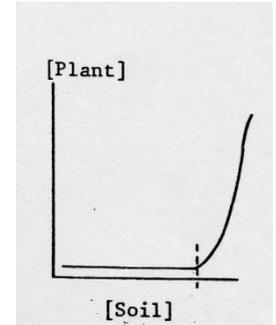
transfert vers les parties aériennes

- **Plantes accumulatrices** $[\text{parties aériennes}]/[\text{sol}] > 1$

mécanisme interne d'accumulation:

absorption massive et translocation vers les parties aériennes

Immobilisation et stockage sous forme non toxique



Hyperaccumulation

«Accumulation dans les parties aériennes de [] 10x supérieures aux [] maximales rencontrées dans les parties aériennes de plantes normales» (Brooks 1998)

Teneurs \geq	0.01%	Cd
(% mat. sèche)	0.1%	Ni, Pb, Cu, Co, As, Se
	1%	Zn, Mn

Ex: *Arabidopsis halleri*: 1.5% Zn

Noccaea caerulescens: 4% Zn



Trace element	Concentration criterion (% in leaf dry matter)	Number of taxa	Number of families represented
Antimony	≥ 0.1	2	2
Cadmium	≥ 0.01	4	2
Cobalt	≥ 0.1	(26)	11
Copper	≥ 0.1	(35)	15
Lead	≥ 0.1	14	7
Manganese	≥ 1.0	10	6
Nickel	≥ 0.1	390	42
Thallium	≥ 0.1	1	1
Zinc	≥ 1.0	14	6

Numbers in brackets refer to unconfirmed data (A. Baker, pers. comm.).

Les espèces hyperaccumulatrices (Reeves et Baker, 2000; Bert *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2004; Vogel-Mikus et al., 2005) in Verbruggen *et al.*, 2009



Hyperaccumulatrice de Tl (≥ 500µg/g) (Saint-Laurent-le-Minier, les Avinières) (Leblanc *et al.* 1999)

La proximité génomique de *Arabidopsis halleri* et de *Noccaea caerulescens* avec [Arabidopsis thaliana](#) a permis des avancées dans la compréhension de la tolérance et de l'accumulation des ETM dans les plantes:

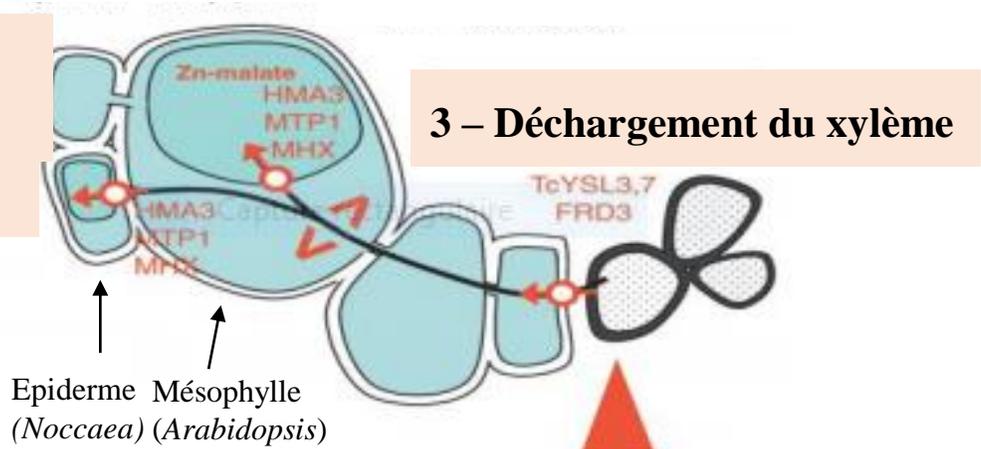
(d'après Verbruggen *et al.* 2009)

4 – Chélation

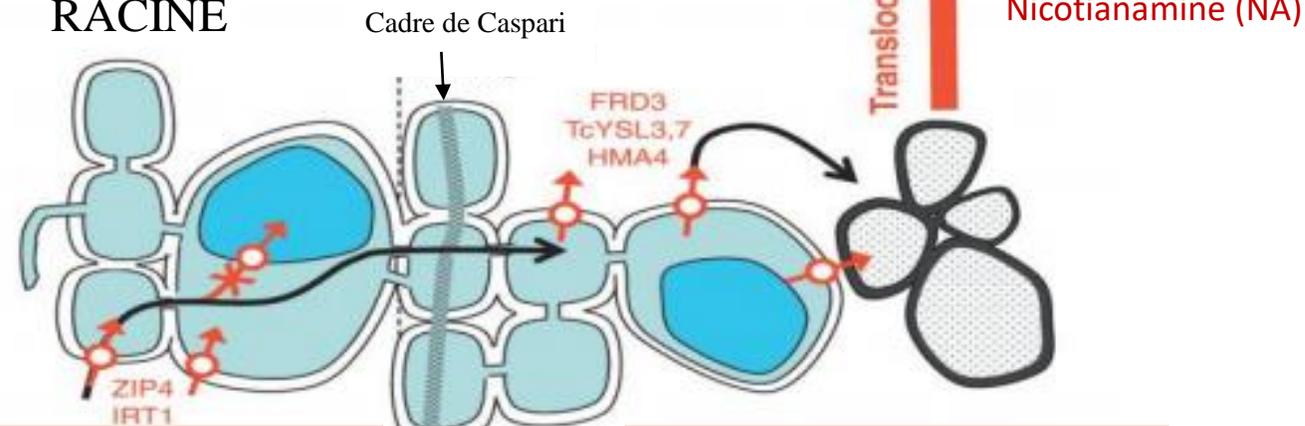
- **Phytochélatines (PCs)**
- **Métallothionéines (MTs)**

5 - Séquestration

FEUILLES



RACINE



1 - Absorption

2 - Chargement du xylème

Epiderme Parenchyme cortical Endoderme Péricycle Parenchyme vasculaire Vaisseau du xylème

Intérêts pratiques des métallophytes

Bioindication et prospection

Dès le XVIème siècle, le célèbre savant Georgius Agricola fait la relation entre les sols riches en minerais et le mauvais développement des végétaux (Agricola 1556).

Recherche des gisements de Cu au Katanga (Duvigneaud 1950)

Les fleurs du Cu: *Haumaniastrum robertii* (Lamiaceae) cuprophyte absolue

Phytoremédiation

Utilisation de plantes supérieures et de leurs microbiotes associés, d'amendement des sols et de techniques agricoles pour éliminer, contenir ou rendre moins toxiques les contaminants environnementaux (Cunningham, 1995)

Phytostabilisation

**Séquestration par des
Métallophytes résistants**

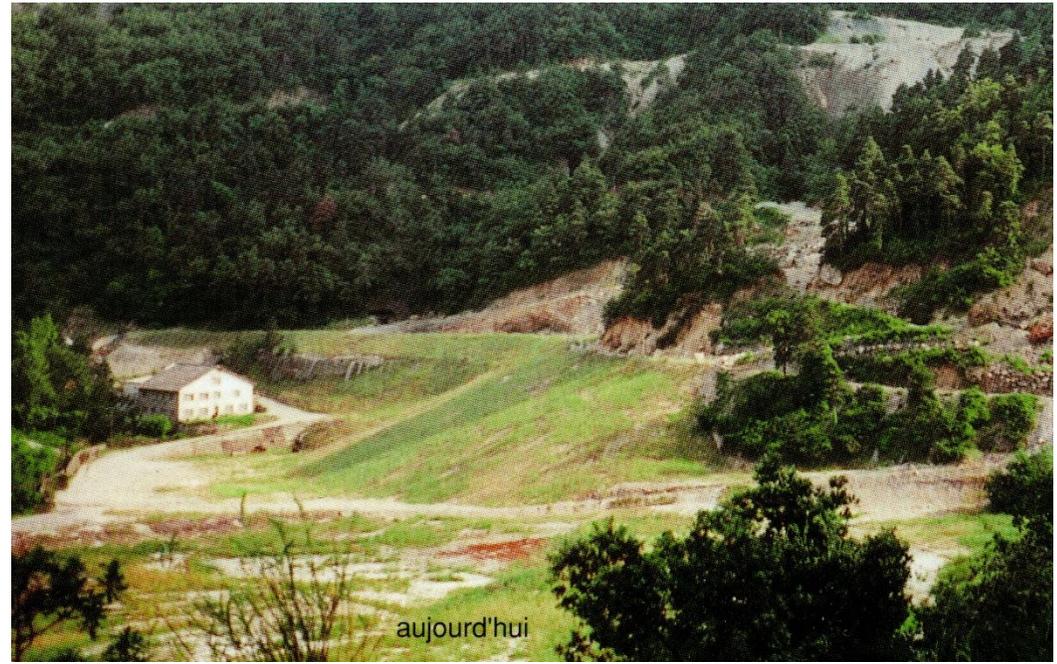
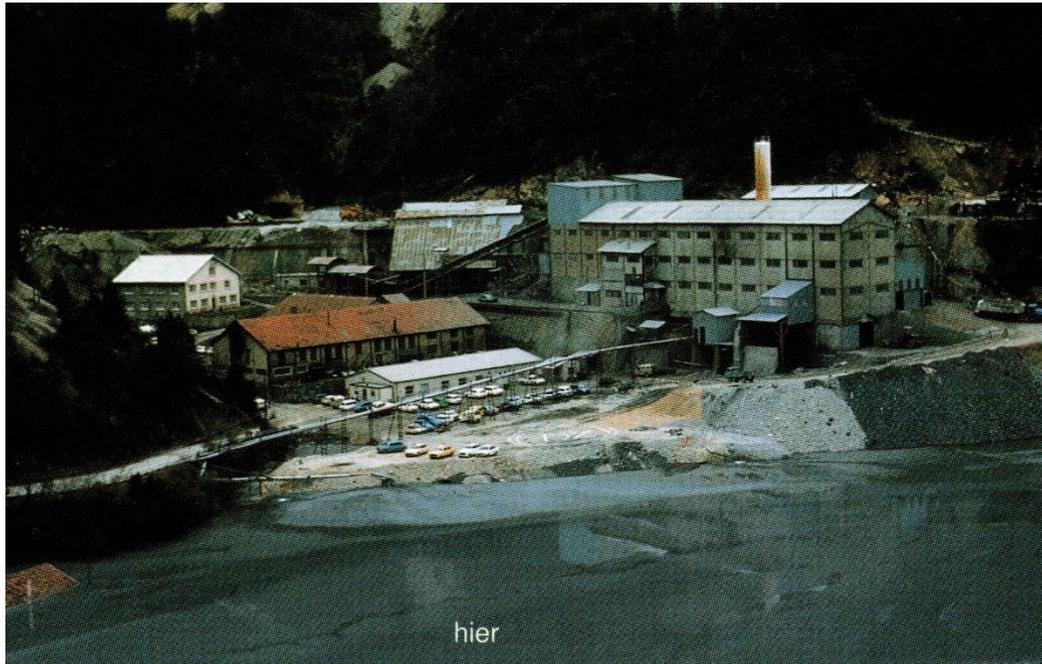
Phytodécontamination

**Réduction de la pollution du sol
Phytoextraction**

Phytostabilisation

- Utilisation de métallophytes résistantes
- Réduire la biodisponibilité des métaux et donc le lessivage
- Eviter l'érosion des sols et l'extension de la pollution
- Perturbation faible et verdurisation du site





Metaleurop Saint-Laurent-le-Minier



Phytodécontamination

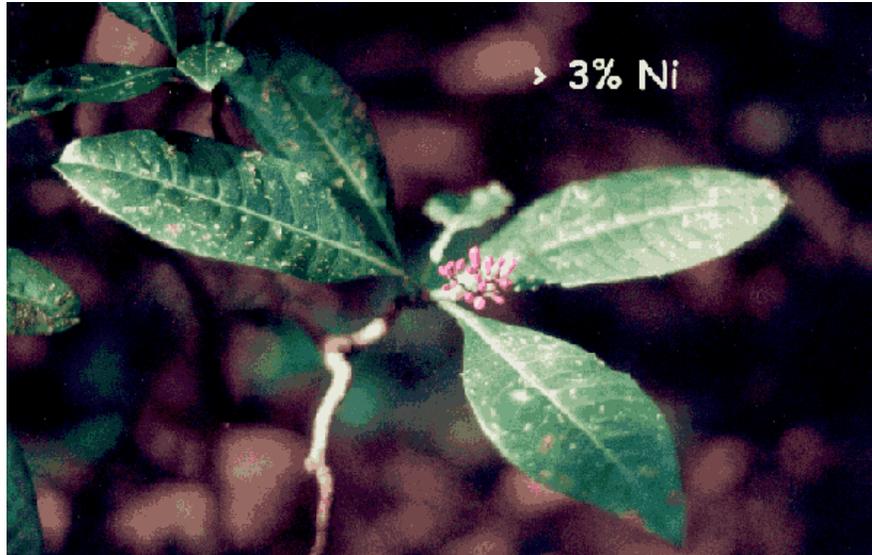
Phytoextraction

Réduction de la pollution du sol par utilisation des **métallophytes hyperaccumulatrices**

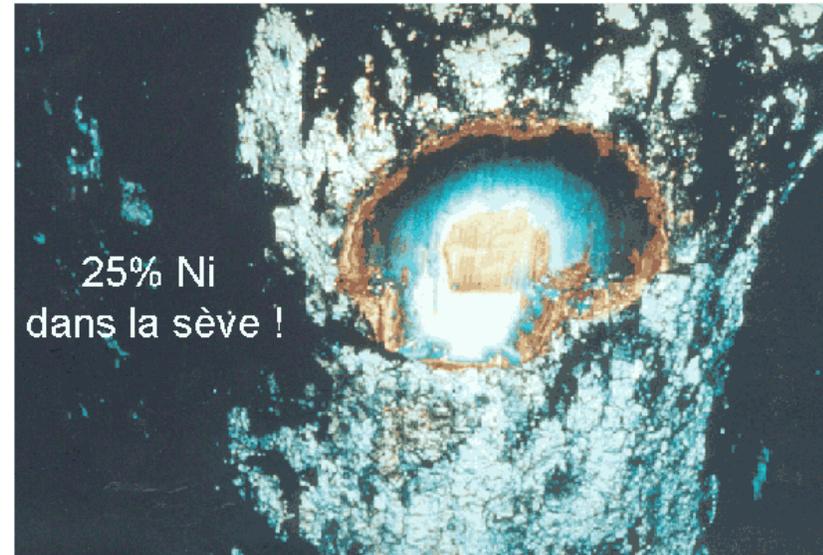
Le choix des espèces est motivé par le Facteur de Bioconcentration du métal (FBC) [feuilles]/ [sol] , variable en fonction du niveau de pollution (1 à 30 pour *Noccaea coerulescence*)

et la production de biomasse (t/ha) (2,5 t/ha pour *Noccaea coerulescence*)

le phytomining



Psychotria douateii (Rubiacées)



Sebertia acuminata (Sapotacées)

Application de la phytoextraction: l'écocatalyse

Claude Grison responsable d'une équipe CNRS « Chimie bio inspirée et Innovations écologiques », Université de Montpellier

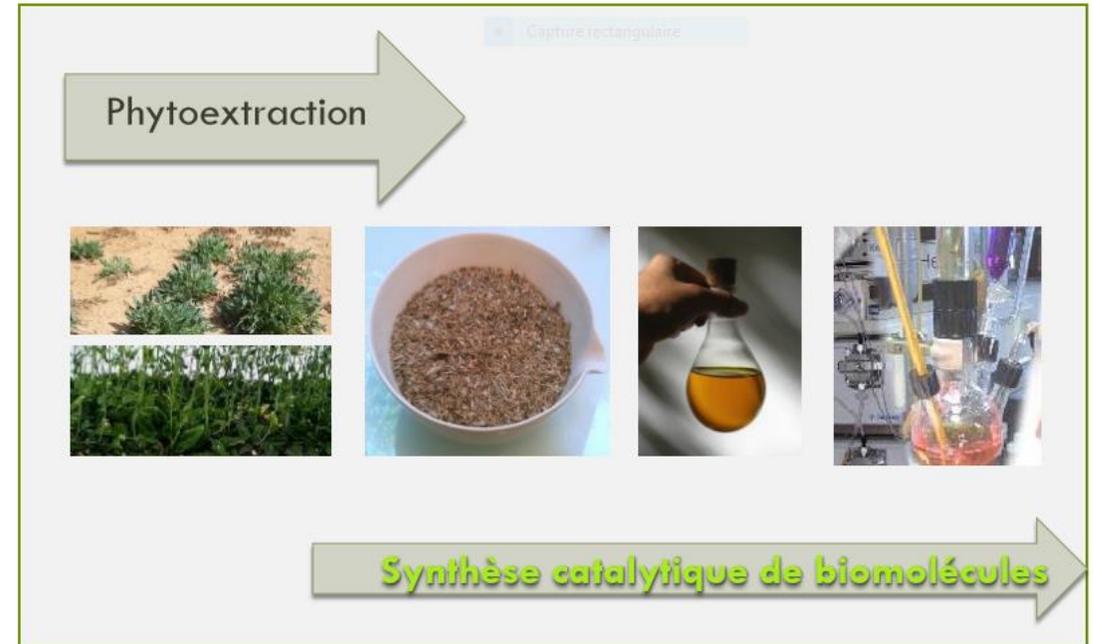
A partir des travaux sur la phytoextraction sur le Site de Saint-Laurent-le-Minier avec :

Anthyllis vulneraria (1,3% de Zn dans la MS)

Noccaea caerulea (1,1% de Zn dans la MS)

Puis en Nouvelle Calédonie avec :

Pycnantha acuminata sève bleue (20% de Ni)



« plus de 2500 molécules différentes ont été préparées par le procédé d'écocatalyse dans divers domaines (médicament, agroalimentaire, bio-cosmétique,...) ex: production du monastrol un antimitotique

Pour conclure

Les connaissances fondamentales sur la compréhension du phénomène tolérance et hyperaccumulation ont nettement progressé depuis que Brooks a forgé ce terme en 1977

Elles ouvrent des horizons dans divers domaines : Environnement, chimie, santé (biofortification),....

