



HAL
open science

Transfert du cadmium du sol vers les plantes agricoles et ses impacts pour la santé

Geraldine Sarret

► **To cite this version:**

Geraldine Sarret. Transfert du cadmium du sol vers les plantes agricoles et ses impacts pour la santé. Journée Thématique Exposition & Pollution, Académie 3 - Espace, Environnement, Risques et Résilience; Université Côte d'Azur, May 2024, Nice, France. hal-04618428

HAL Id: hal-04618428

<https://hal.science/hal-04618428v1>

Submitted on 20 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Transfert du cadmium du sol vers les plantes agricoles et ses impacts pour la santé

Géraldine Sarret

Institut des Sciences de la Terre (ISterre), Grenoble

JOURNÉE THÉMATIQUE de l'Académie "Espace, Environnement, Risques et Résilience"

EXPOSITION & POLLUTION

Lundi 27 Mai 2024 Parc Phoenix, Nice

48

Cd

Cadmium

112.411

Aucune fonction biologique sauf une enzyme de diatomées marines



Toxique à très faible concentration

Toxicité humaine : s'accumule dans les reins => dysfonctionnement rénal, dans les os (substitution Ca/Cd) => ostéoporose et cancers

Demi-vie dans le corps humain : 22-30 ans

La maladie d'itai-itai, cas unique au monde d'empoisonnement au cadmium à grande échelle (préfecture de Toyama, Japon, 1950).



En amont: Mine et fonderies de Zn

En aval: Irrigation, habitations, pêche

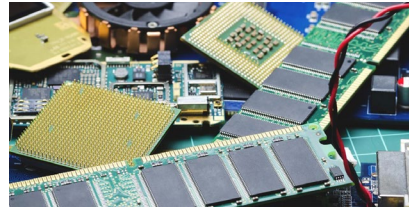
48

Cd

Cadmium
112.411

Applications principales

Batteries, semiconducteurs , traitement de surface



Pigments dans les peintures



Cadmium red
(CdS/CdSe)

Matisse



Cadmium yellow (CdS)



Van Gogh



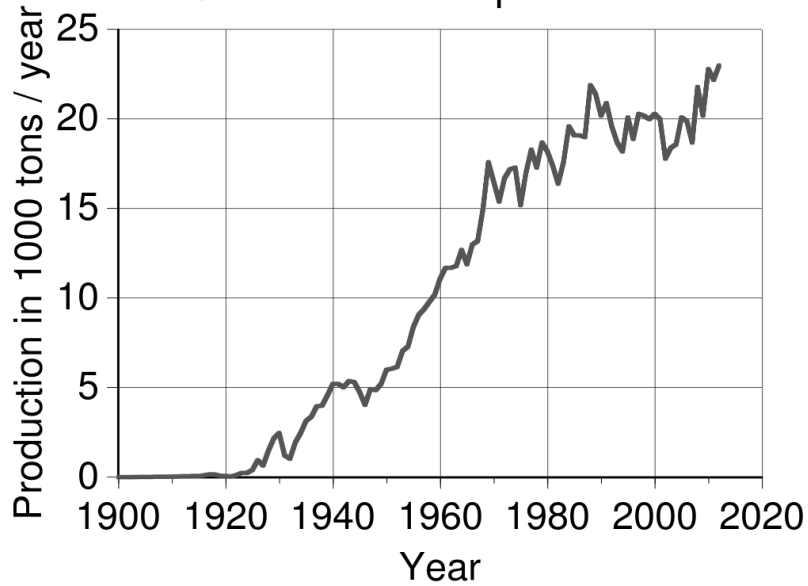
Van Gogh

Pigments dans les plastiques

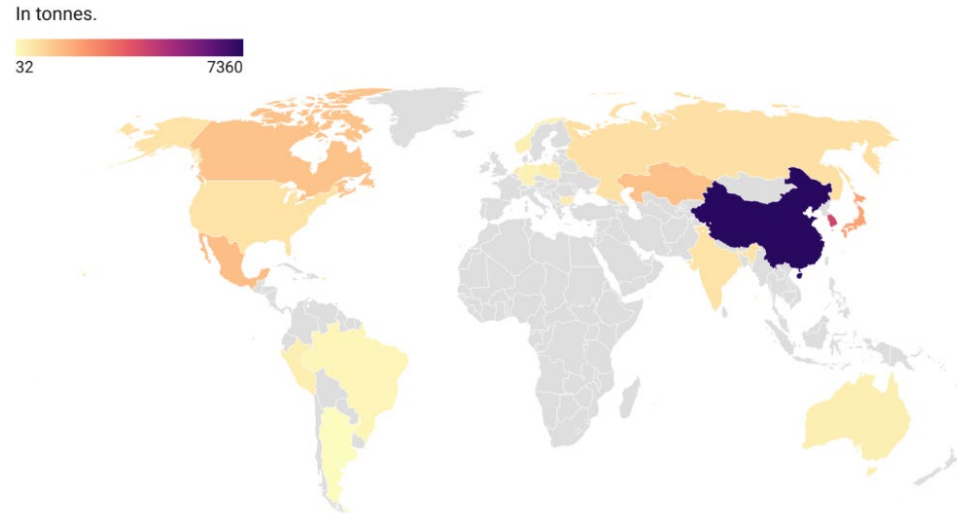


Turner et al., STOTEN 2018

Cadmium world production



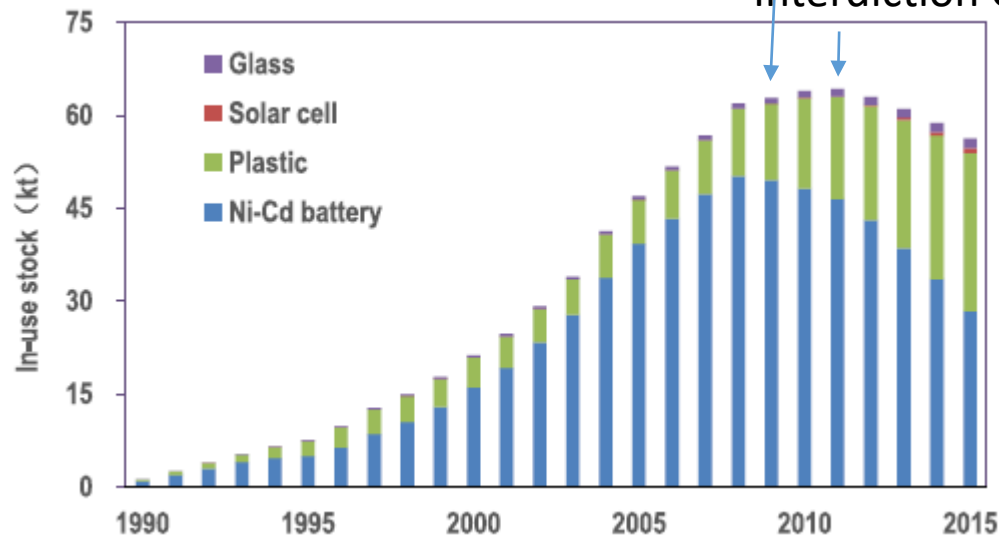
World cadmium production, 2010



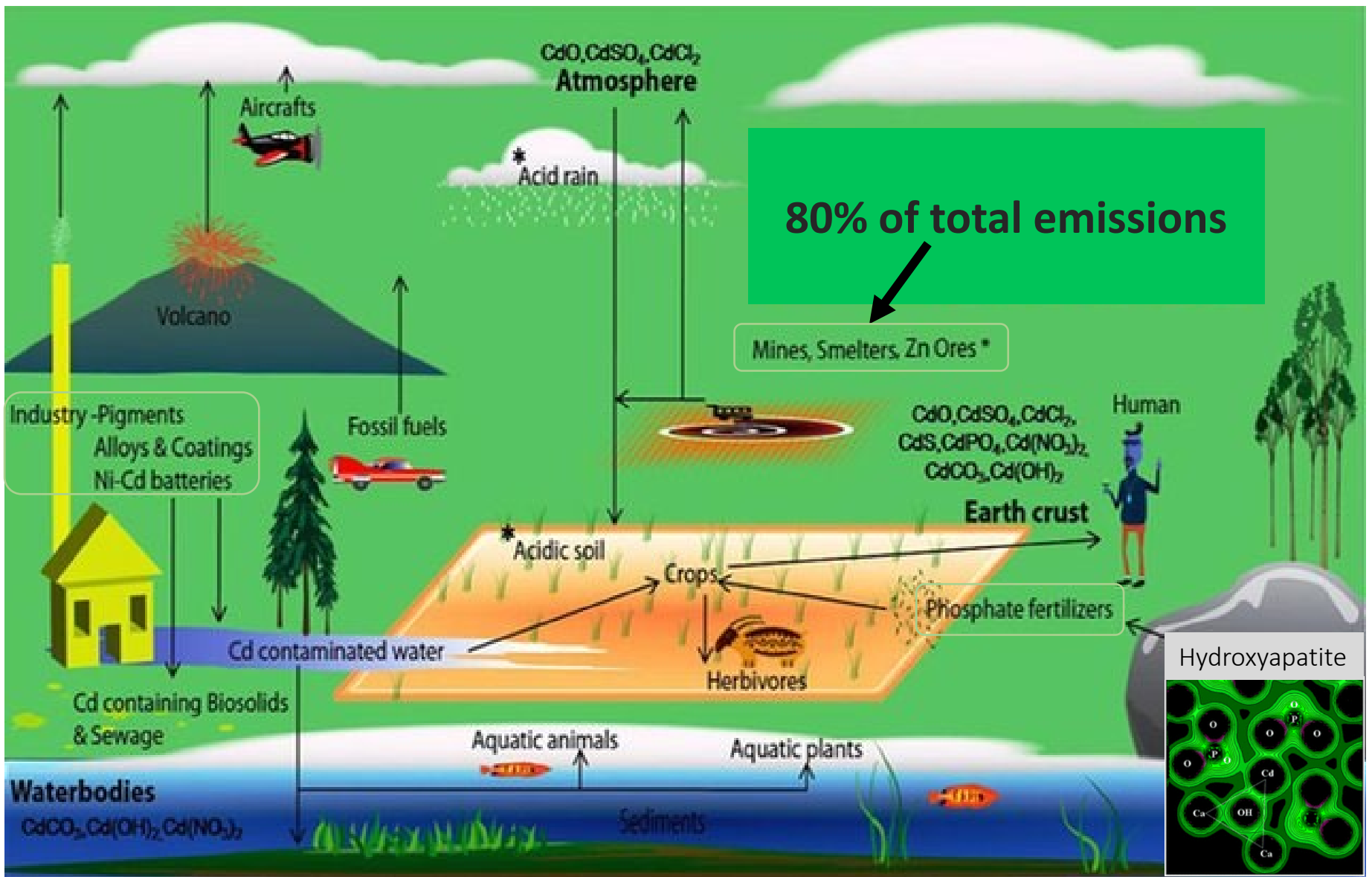
Map: J.J. Liu • Source: US Geological Survey • Created with Datawrapper

Produits contenant du Cd fabriqués en Chine

Interdiction Cd batteries en Europe
Interdiction Cd plastiques en Europe



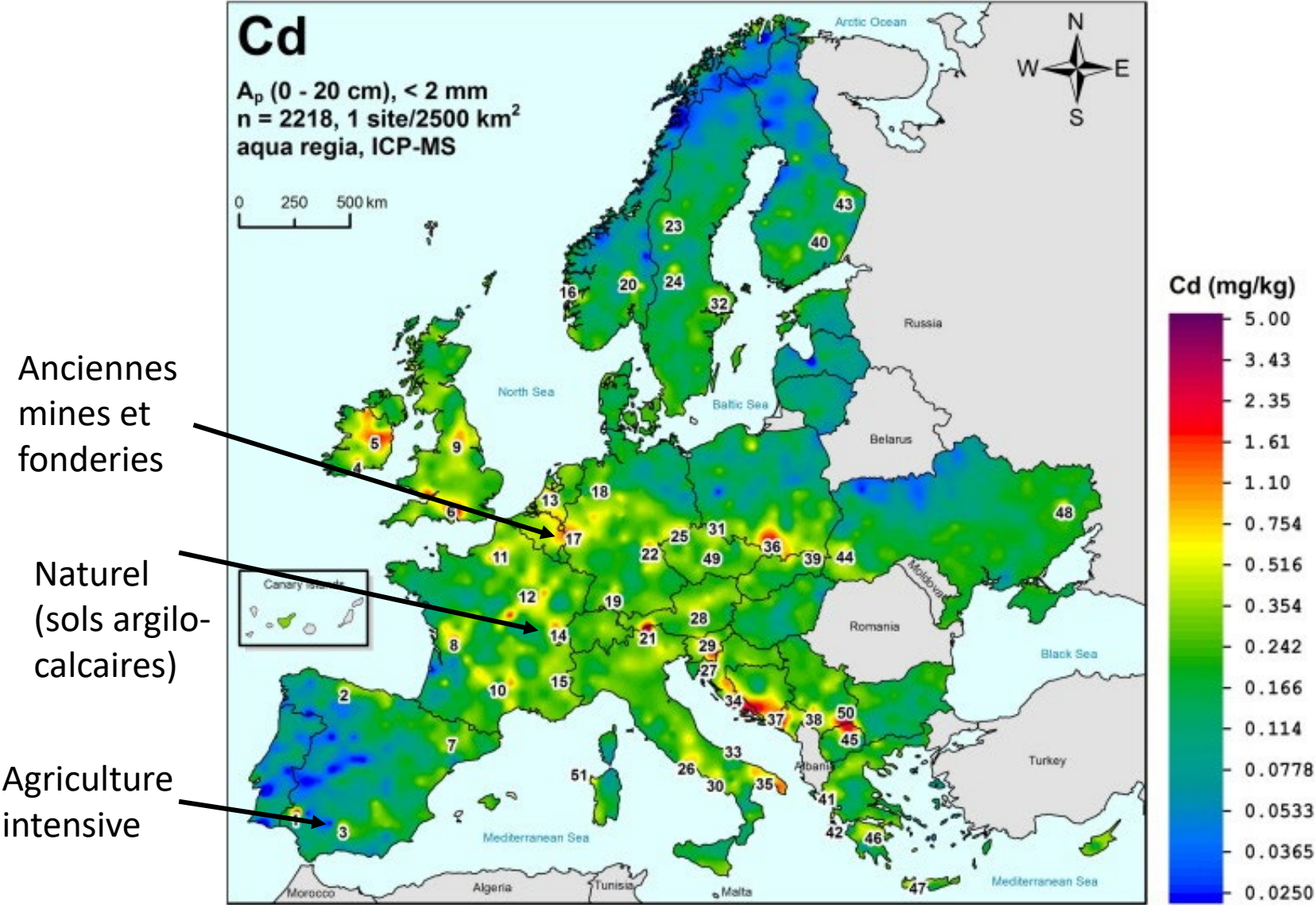
(Shi et al., 2019)



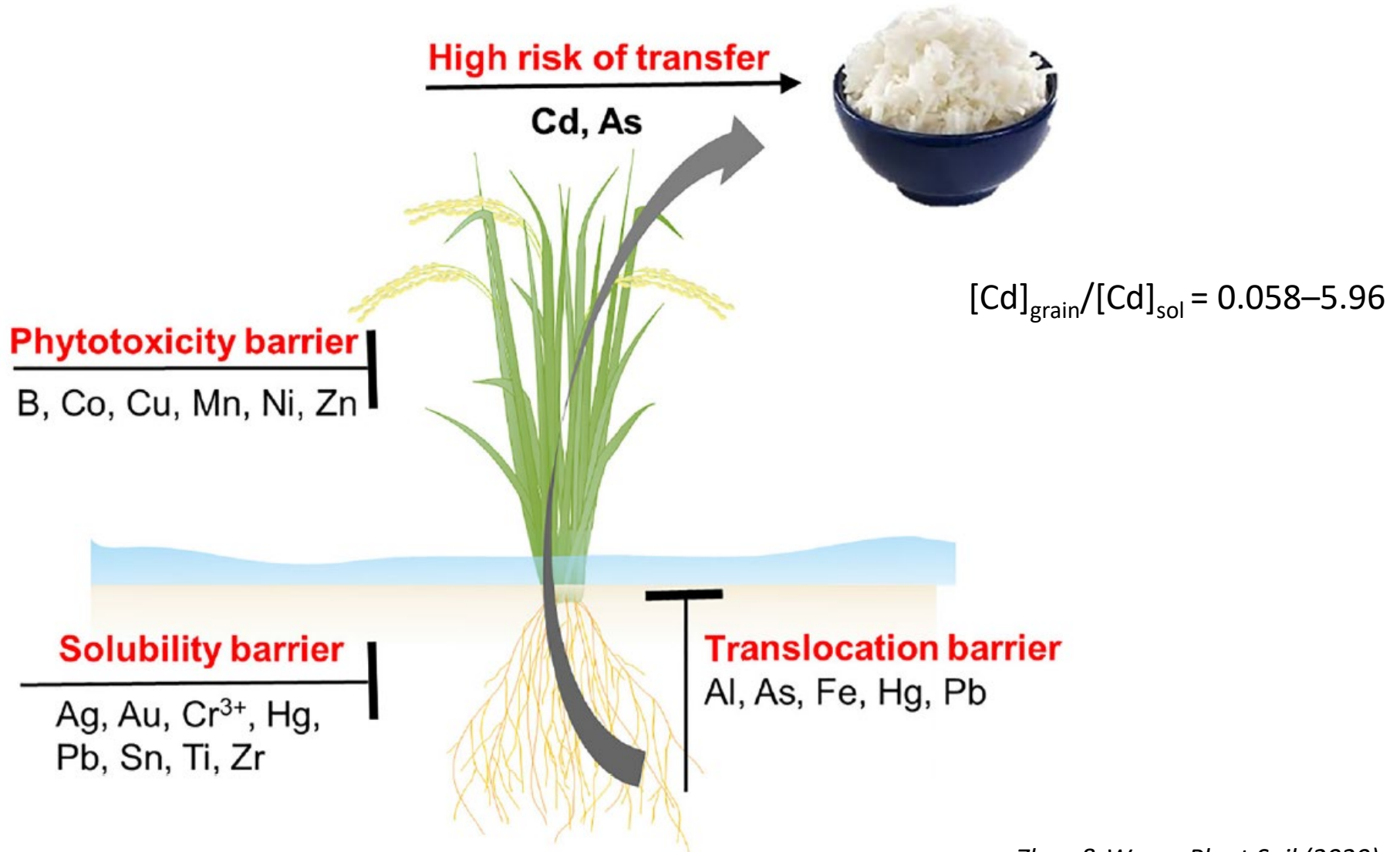
Sebastian et al., 2014

Terra et al., 2010

Cd dans les sols en Europe

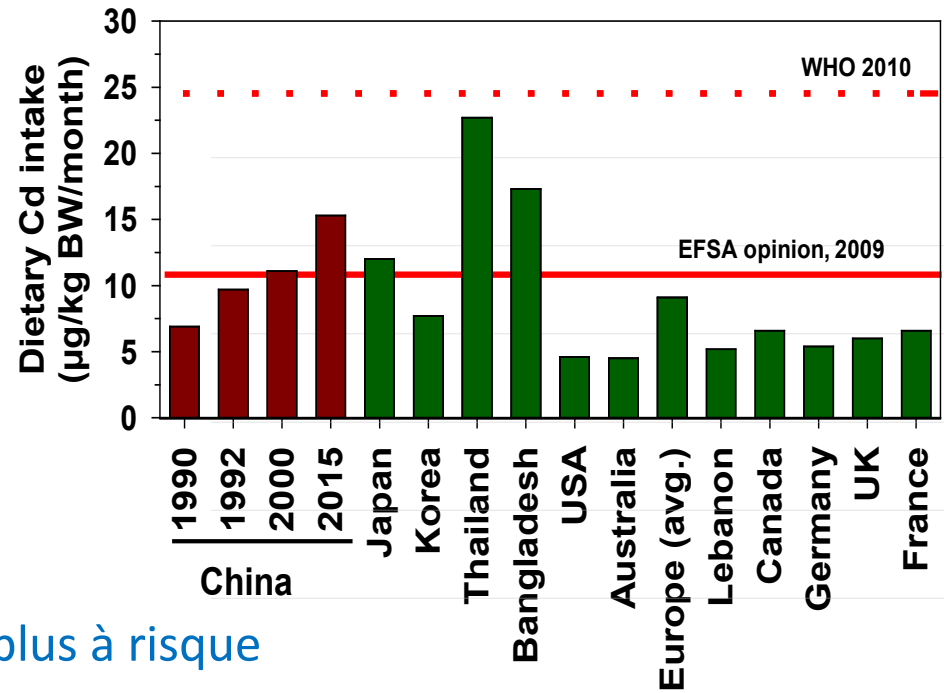


Le Cd s'accumule plus dans les productions agricoles que la plupart des métaux



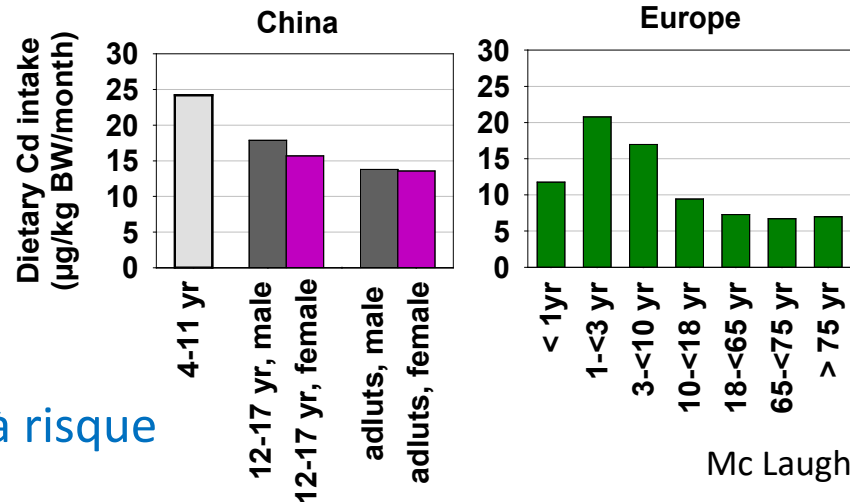
L'alimentation = source principale d'exposition humaine (sauf pour les fumeurs)

Dose journalière moyenne par pays



=> Les populations asiatiques sont les plus à risque

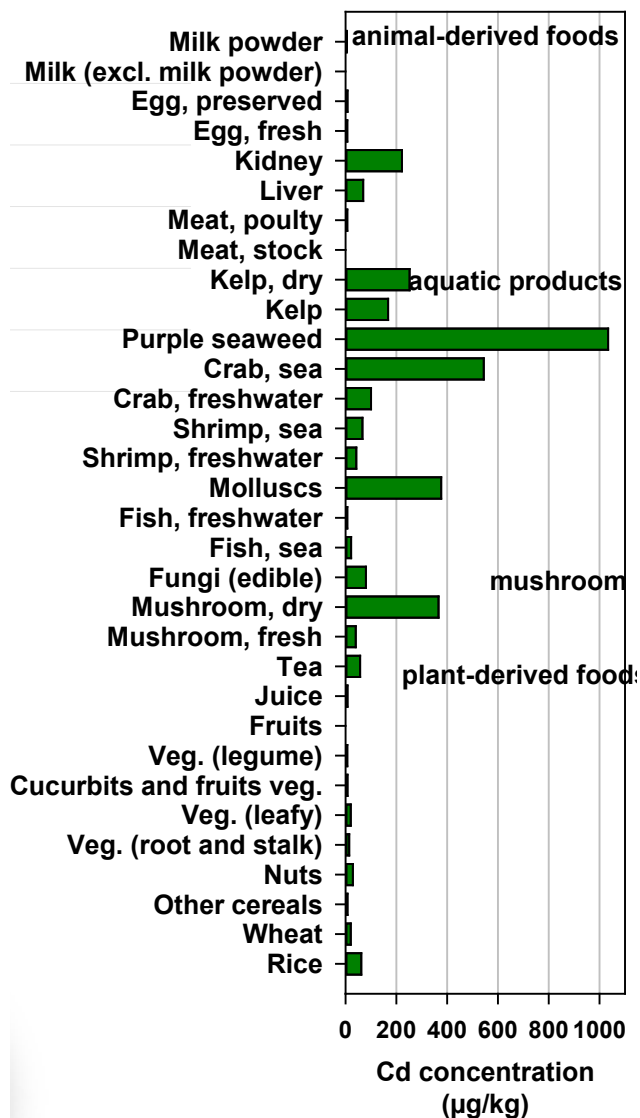
Dose journalière moyenne par âge



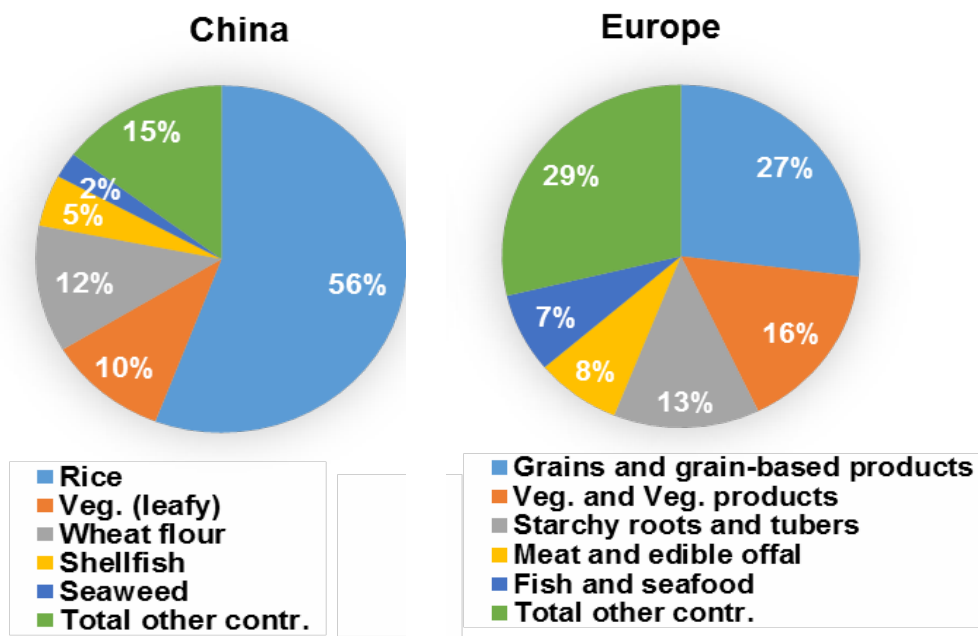
=> Les jeunes enfants sont les plus à risque

Quels aliments sont les principales sources de cadmium ?

Teneurs en Cd dans les aliments



Distribution des sources de Cd dans l'alimentation



Mc Laughlin et al., 2020

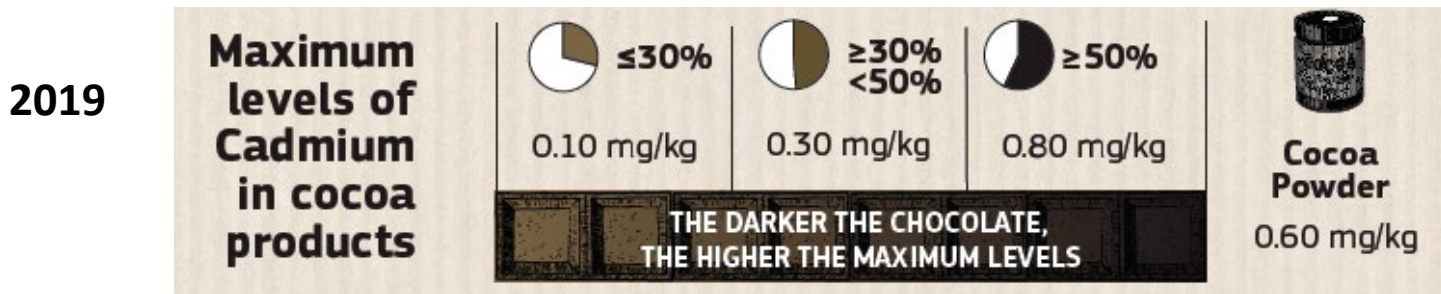
ÉTUDES ET ENQUÊTES
IMPRÉGNATION
DE LA POPULATION FRANÇAISE
PAR LE CADMIUM

Programme national de biosurveillance,
Esteban 2014-2016

- 48% de la population adulte présente un taux de Cd supérieur au seuil critique défini par l'ANSES
- Les niveaux de Cd ont augmenté entre 2006-2007 et 2014-2016
- Les niveaux de Cd sont plus élevés en France que dans les autres pays d'Europe et aux États-Unis

Actions prises à l'échelle européenne pour réduire l'exposition au Cd

- Teneurs limites dans les céréales, légumes, viande, poisson, crustacés, ... et récemment dans le chocolat



- Teneurs limites dans les engrais phosphatés

Limite actuelle : 60 mg Cd/kg P₂O₅

Limites futures, en discussion : 40 puis 20 mg Cd/kg P₂O₅

Pistes de recherche pour réduire l'exposition au Cd

Physiologie, écophysiologie, génétique des plantes

Sciences de l'alimentation

Contribution des apports atmosphériques

Sélection de cultivars, amélioration des plantes

Bioaccessibilité du Cd dans les aliments

Transport and detoxification dans la plante:
Gènes et approches Omiques
Imagerie et spéciation
Traçage et fractionnement isotopique

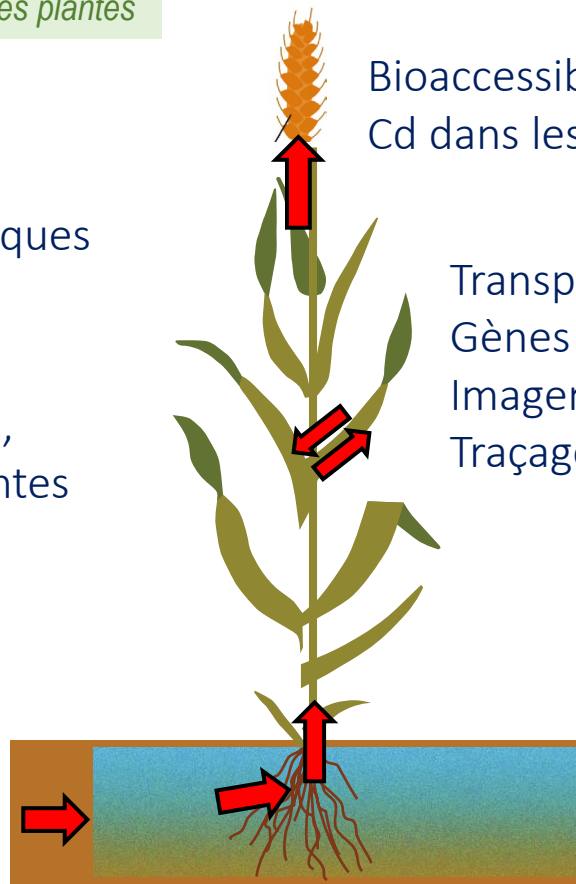
Agronomie

Effect des conditions nutritives

Sciences du sol, géochimie

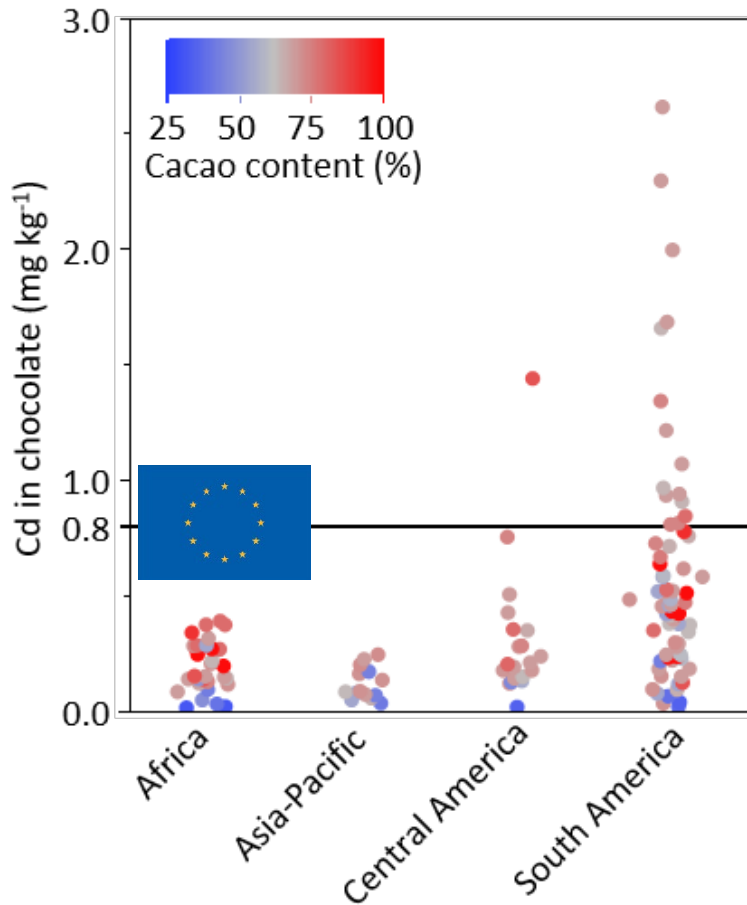
Zn, Fe, Se ↔ Cd

Paramètres contrôlant la phytodisponibilité



Espèces les plus étudiées : céréales (riz, blé) et hyperaccumulatrices

Le cas du cadmium dans le cacao



En Equateur (3ème exporteur mondial de cacao):

30 à 50 % des fèves analysées dépassent la limite européenne

Pertes estimées ~ 750 million US\$
(Vázquez-deCastro et al, 2023)

Comment réduire le Cd dans le cacao?

Journey of Cd from soil to chocolate bar

3. Loading into pod tissues



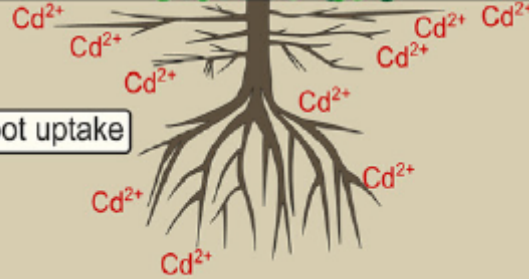
2. Translocation to shoot tissues




4. Transfer to the final product





1. Root uptake



Potential mitigation strategies

I. Soil amendments 

II. Genetics 

III. Postharvest 

Vanderschueren et al. 2021, STOTEN



Récolte



Fermentation



Séchage

Export
(analyse Cd)

Torrefaction
etc...

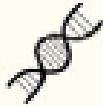
Potential mitigation strategies



I. Soil amendments



II. Genetics



III. Postharvest



Amendements testés :

Chaux, biochar, compost , gypse



Pas de diminution significative du Cd dans les fèves 22-30 mois après les amendements

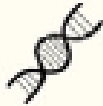
Argüello et al. 2023. *Chemosphere*.
Vanderschueren et al. 2021, *STOTEN*

Potential mitigation strategies

I. Soil amendments



II. Genetics



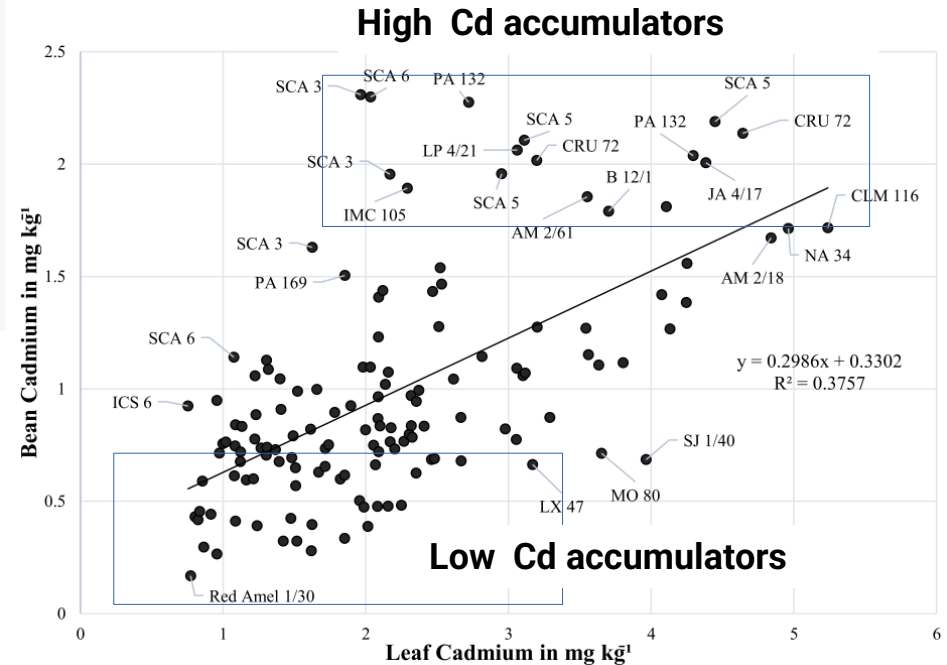
III. Postharvest



International Cocoa Genebank, Trinidad



$[Cd]_{\text{fèves}} \text{ vs } [Cd]_{\text{feuilles}}$



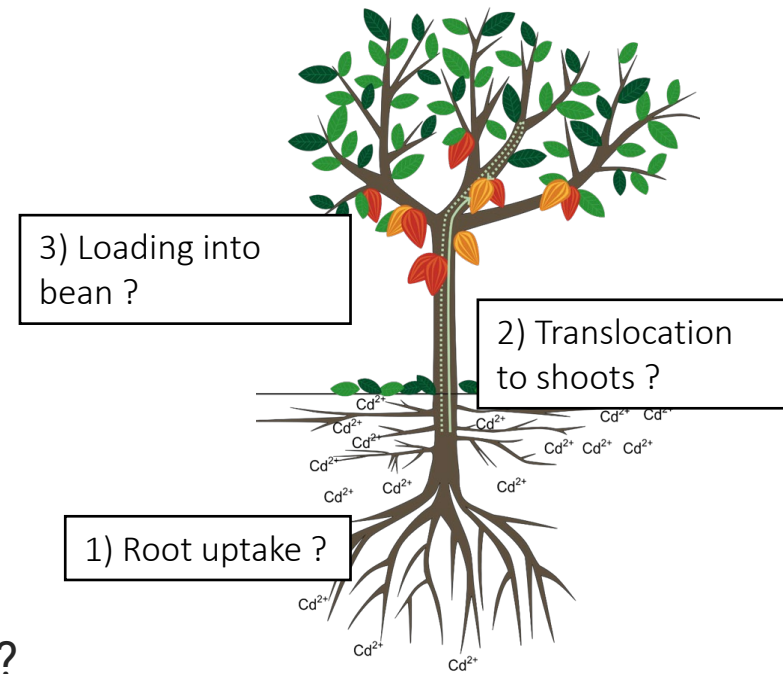
Lewis et al. 2019. STOTEN.

⇒ Forte variabilité intraspécifique de l'accumulation de Cd chez des variétés natives

⇒ Potentiel pour sélectionner/créer des variétés agronomiques faiblement accumulatrices

Questions

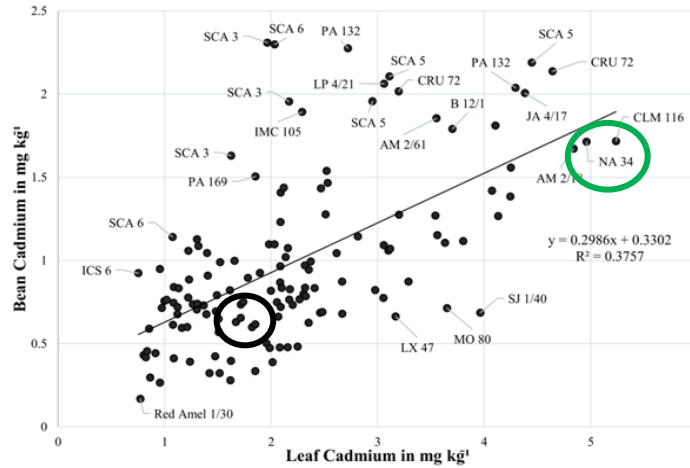
- Origine de la variabilité intraspécifique d'accumulation du Cd ?



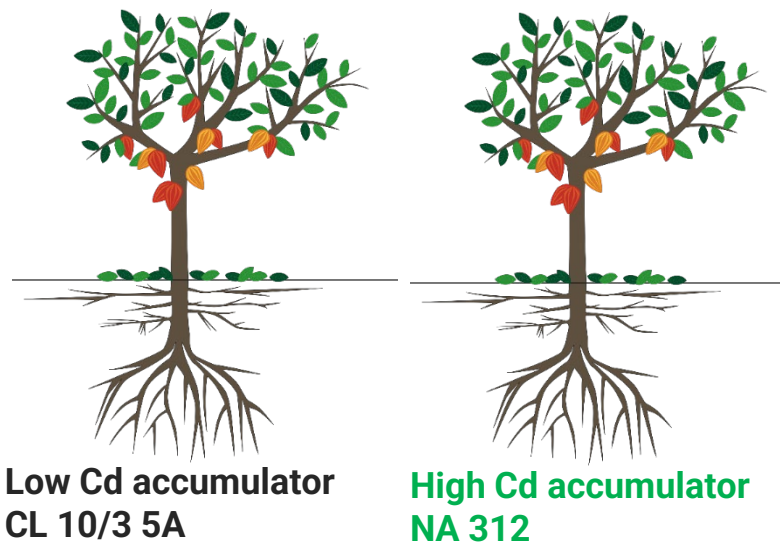
- Ou est stocké le Cd aux différentes échelles ?
- Comment est il détoxifié/immobilisé ?
- Comment est il transféré dans les fèves ?

Comparaison de deux variétés natives, High et Low

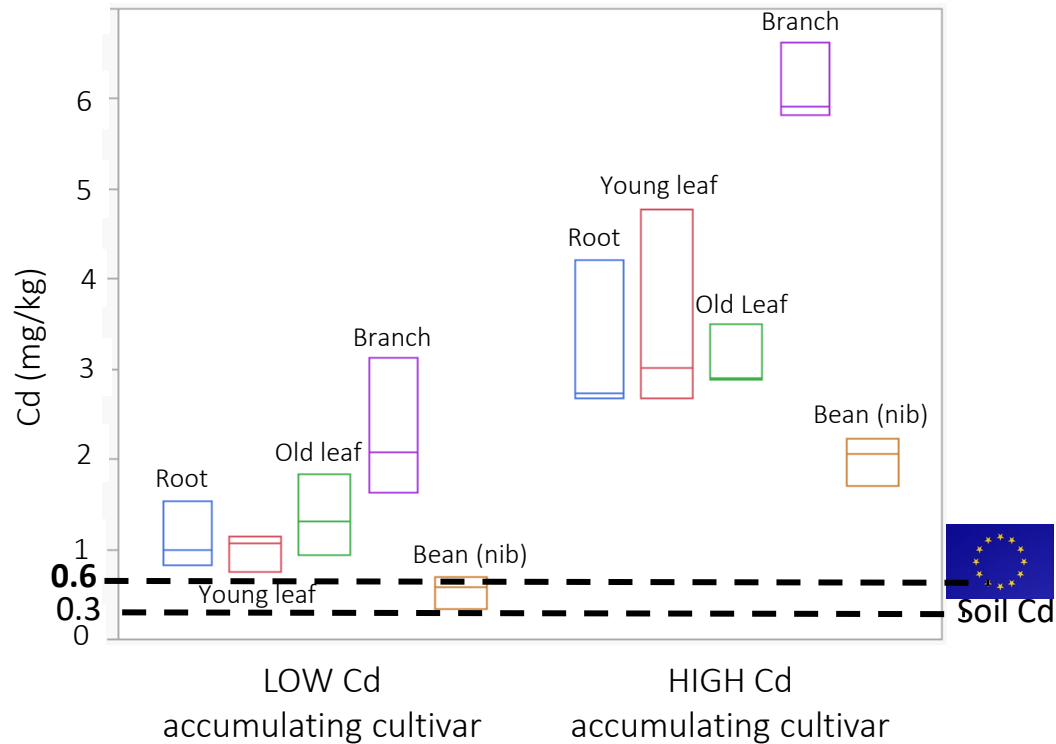
International Cocoa Genebank, Trinidad



Lewis et al. 2019, Science of the Total Environment



Concentration en Cd dans les organes

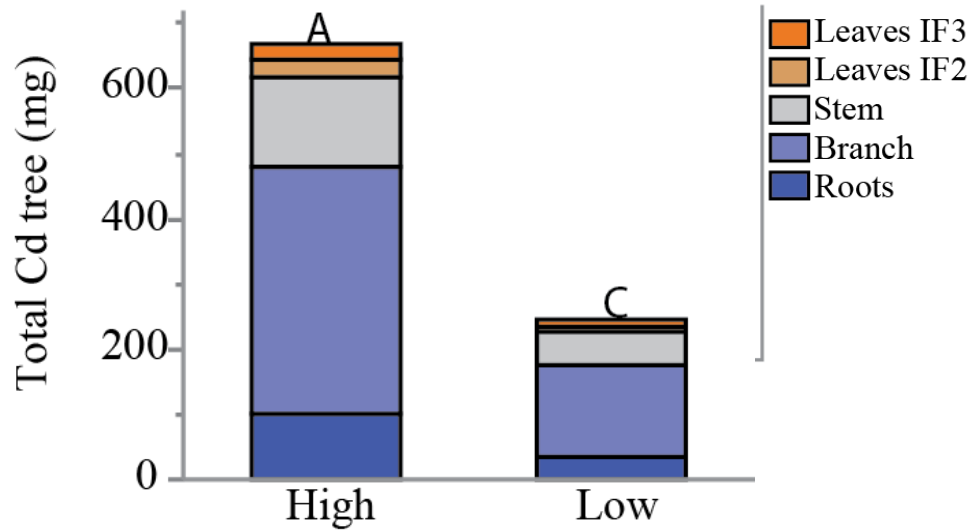


- Facteurs de transfert $\gg 1$

Theobroma cacao L. est un « accumulateur modéré »

- Branches > racines = feuilles > fèves, pour les deux cultivars
- Principale différence entre les cultivars : Absorption racinaire, et non la répartition entre organes
- Milieu non contaminé, concentrations très faibles => challenge analytique

Stocks de Cd dans la plante (concentration x biomasse)

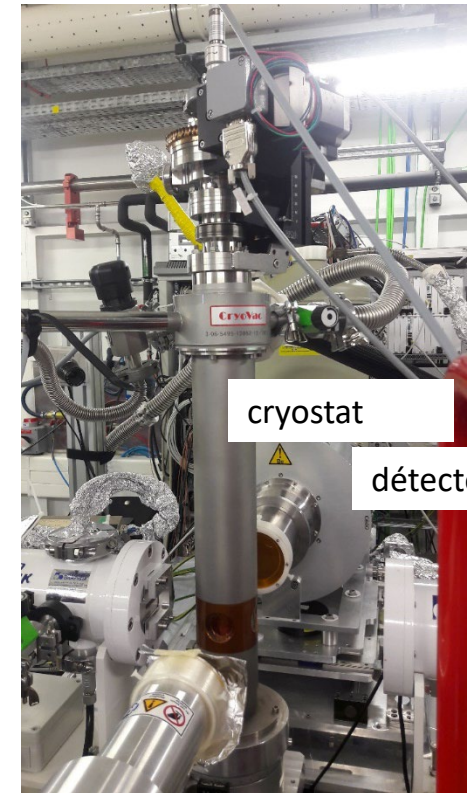
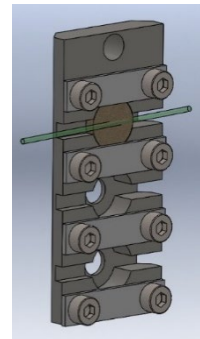
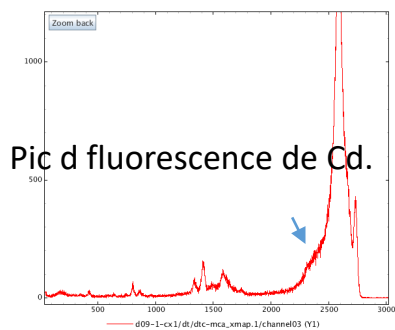


- Les racines stockent seulement 10-20% du Cd
- Les parties ligneuses tronc et branches sont les organes de stockage principaux
- Les fruits stockent moins de 1% du Cd total

Formes du Cd dans la plante et lieux de stockage

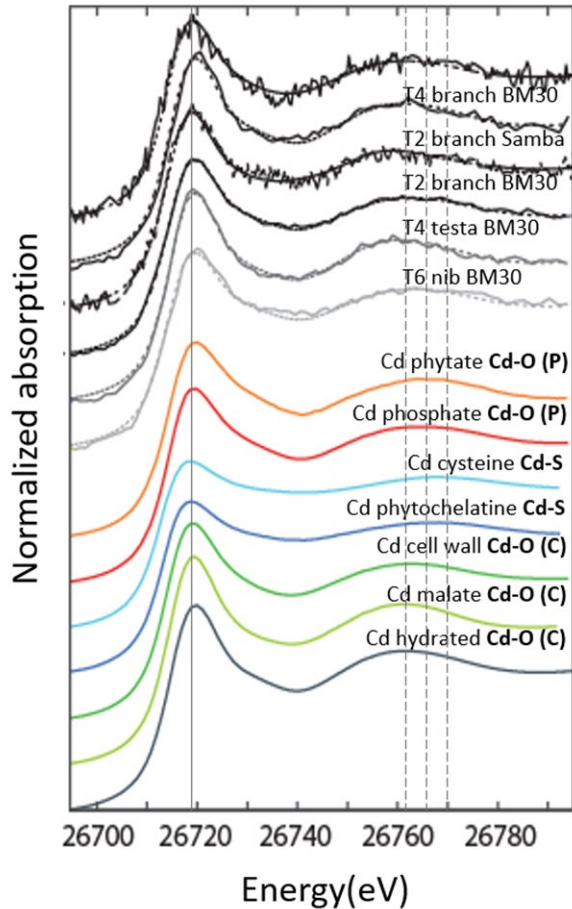
Préparation d'échantillons pour la spectroscopie d'absorption X au synchrotron

@ SAMBA (Soleil) and FAME (ESRF)

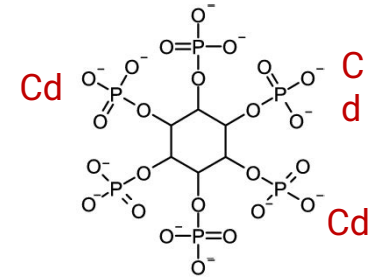


Forme du Cd dans les fèves (High accumulator)

SAMBA, Soleil
BM30, ESRF



Cd (mg kg ⁻¹)	Tissue	Replicate	Beamline	R-factor LCF	Fraction of total Cd				
					0	0.2	0.4	0.6	0.8
2.2	Nib	T6	BM30	0.00063	[Bar chart showing ~90% Cd-O (P) and ~10% Cd-S]				
				0.00066	[Bar chart showing ~60% Cd-O (P) and ~40% Cd-S]				
2.5	Testa	T4	BM30	0.00053	[Bar chart showing ~100% Cd-O (C)]				
1.9	Branch	T4	BM30	0.00023	[Bar chart showing ~100% Cd-O (C)]				
1.9	Branch	T4	Samba	0.00156	[Bar chart showing ~100% Cd-O (C)]				
				0.00156	[Bar chart showing ~70% Cd-O (P) and ~30% Cd-S]				
2.1	Branch	T6	BM30	0.00169	[Bar chart showing ~100% Cd-O (P)]				
2.1	Branch	T6	Samba	0.00242	[Bar chart showing ~100% Cd-O (C)]				
				0.00246	[Bar chart showing ~100% Cd-O (C)]				



Blommaert et al. 2022, *FiPS*

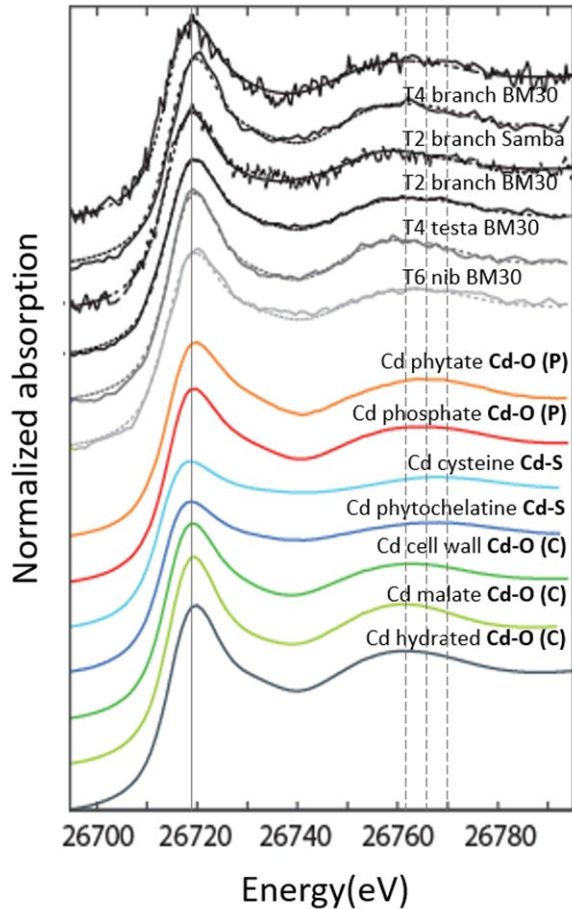
- Cd lié à des groupes oxygène (carboxyl ou phosphoryl)
- Spéciation calculée par visual Minteq => les **phytates** seraient les ligands principaux dans les fèves

- A plus forte concentration en Cd, les groupes thiol deviennent prépondérants

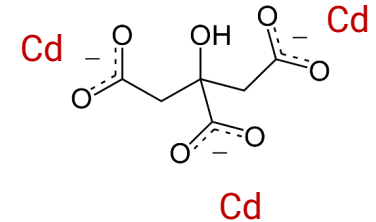
Blommaert et al. 2023, *Food chem*

Cadmium speciation in branches (high accumulator)

SAMBA, Soleil
BM30, ESRF



Cd (mg kg ⁻¹)	Tissue	Replicate	Beamline	R-factor LCF	Fraction of total Cd				
					0	0.2	0.4	0.6	0.8
2.2	Nib	T6	BM30	0.00063	[Bar chart showing ~90% Cd-O (P) and ~10% Cd-S]				
				0.00066	[Bar chart showing ~60% Cd-O (P) and ~40% Cd-S]				
2.5	Testa	T4	BM30	0.00053	[Bar chart showing ~100% Cd-O (C)]				
1.9	Branch	T4	BM30	0.00023	[Bar chart showing ~80% Cd-O (C) and ~20% Cd-S]				
1.9	Branch	T4	Samba	0.00156	[Bar chart showing ~100% Cd-O (C)]				
				0.00156	[Bar chart showing ~70% Cd-O (P) and ~30% Cd-S]				
2.1	Branch	T6	BM30	0.00169	[Bar chart showing ~100% Cd-O (P)]				
2.1	Branch	T6	Samba	0.00242	[Bar chart showing ~100% Cd-O (C)]				
				0.00246	[Bar chart showing ~100% Cd-S]				



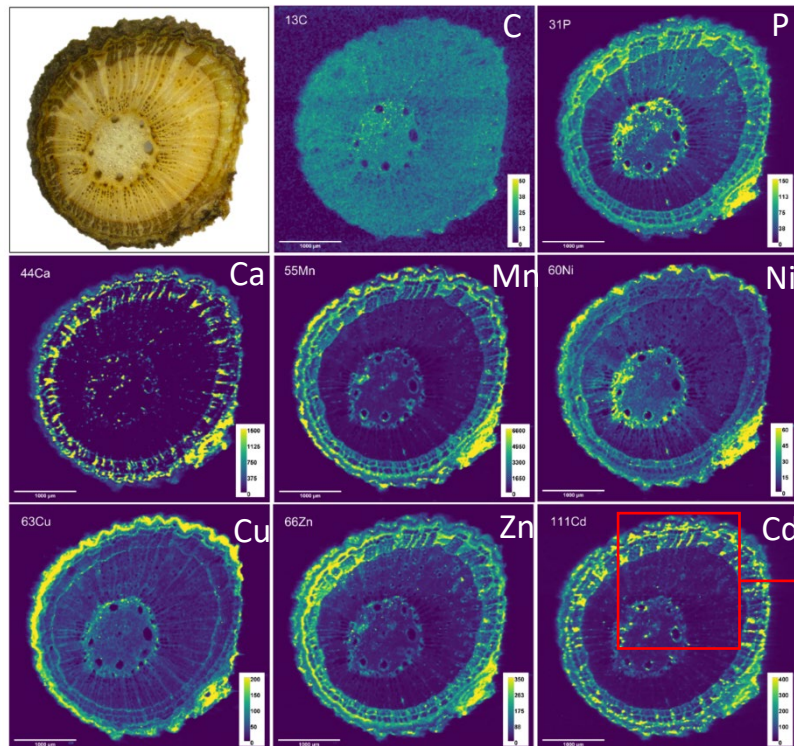
Blommaert et al. 2022, *FiPS*

- Cd principalement lié à des groupes COOH/OH. d'acides organiques et/ou des parois cellulaires

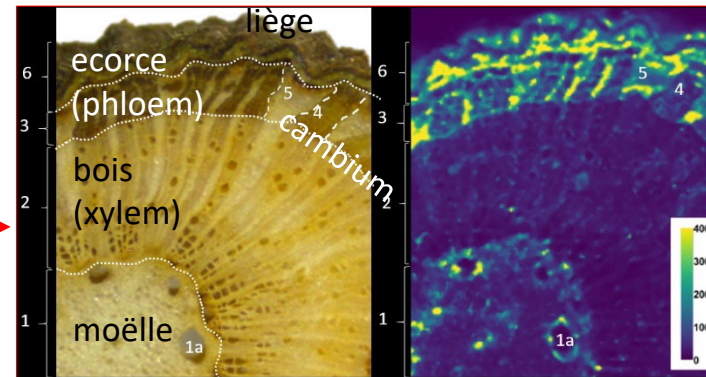
=> Les ligands thiols, qui jouent un rôle prépondérant chez les espèces non accumulatrices, jouent un rôle mineur dans le cacao (sauf à forte exposition).

Distribution des éléments dans les branches (high et low)

LA ICP MS



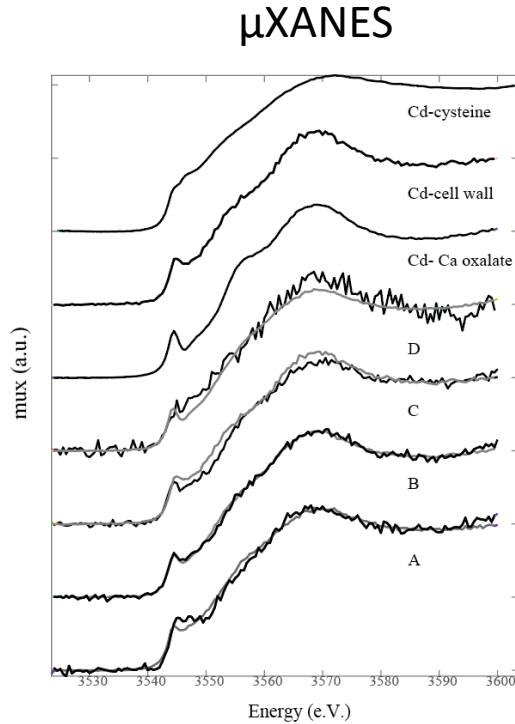
Tissue	Intensity [§]	R ² ^{§§}					
		Cd	Ca	Mn	Zn	Cu	Ni
1 Medulla/pith	2.87	0.32	0.44	0.36	0.12	0.26	0.34
2 Wood	1	0.27	0.36	0.40	0.31	0.21	0.32
3 Bark phloem	4.40	0.43	0.54	0.48	0.30	0.24	0.45
4 Phloem vessels	2.39	0.37	0.51	0.52	0.28	0.18	0.47
5 Phloem Rays	7.29	0.26	0.41	0.35	0.15	0.15	0.29
6 Periderm	7.17	0.13	0.49	0.5	0.24	0.34	0.11



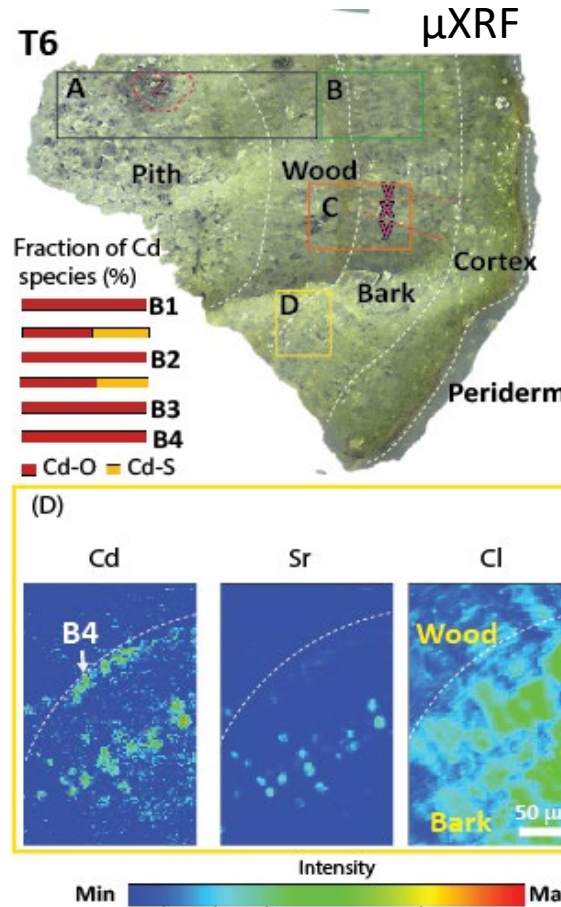
Blommaert et al. 2022, *FIPS*

- Cd stocké principalement dans l'écorce (phloem) et le liège, et aussi dans les vaisseaux excréteurs de mucilage
- Transfer horizontal (xylem-phloème) via les rayons ligneux

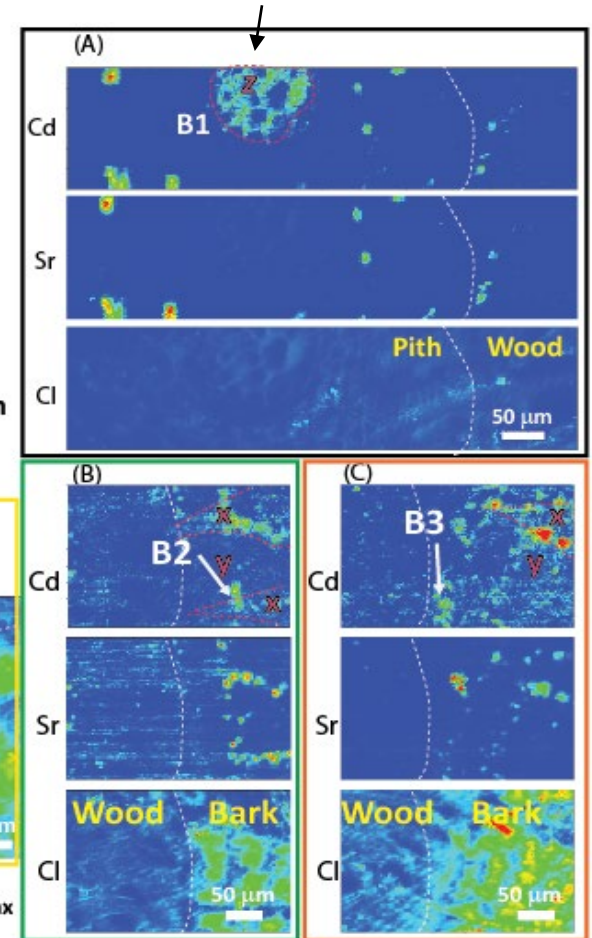
Localisation et spéciation du Cd dans les branches (high)



- Cd principalement lié à des groupes COOH/OH



Vaisseau sécréteur de mucilage

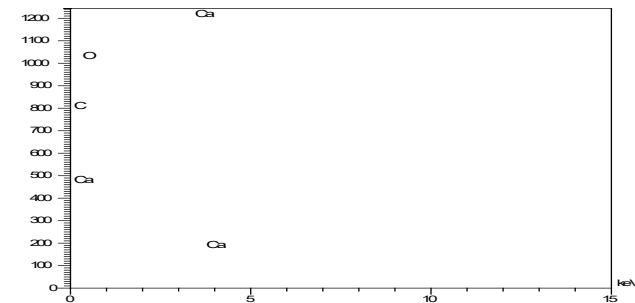
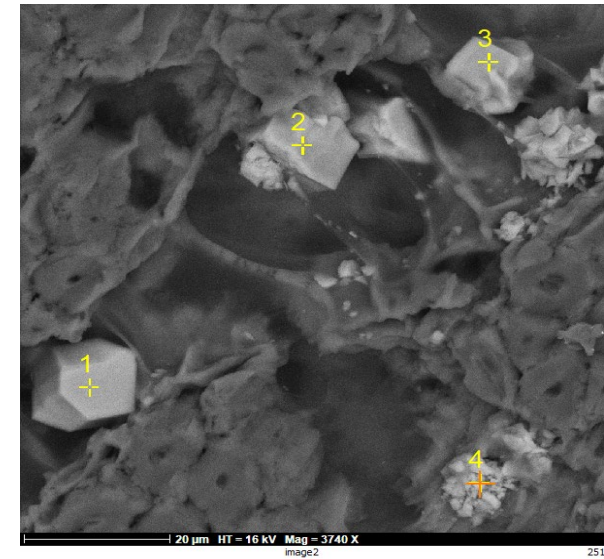
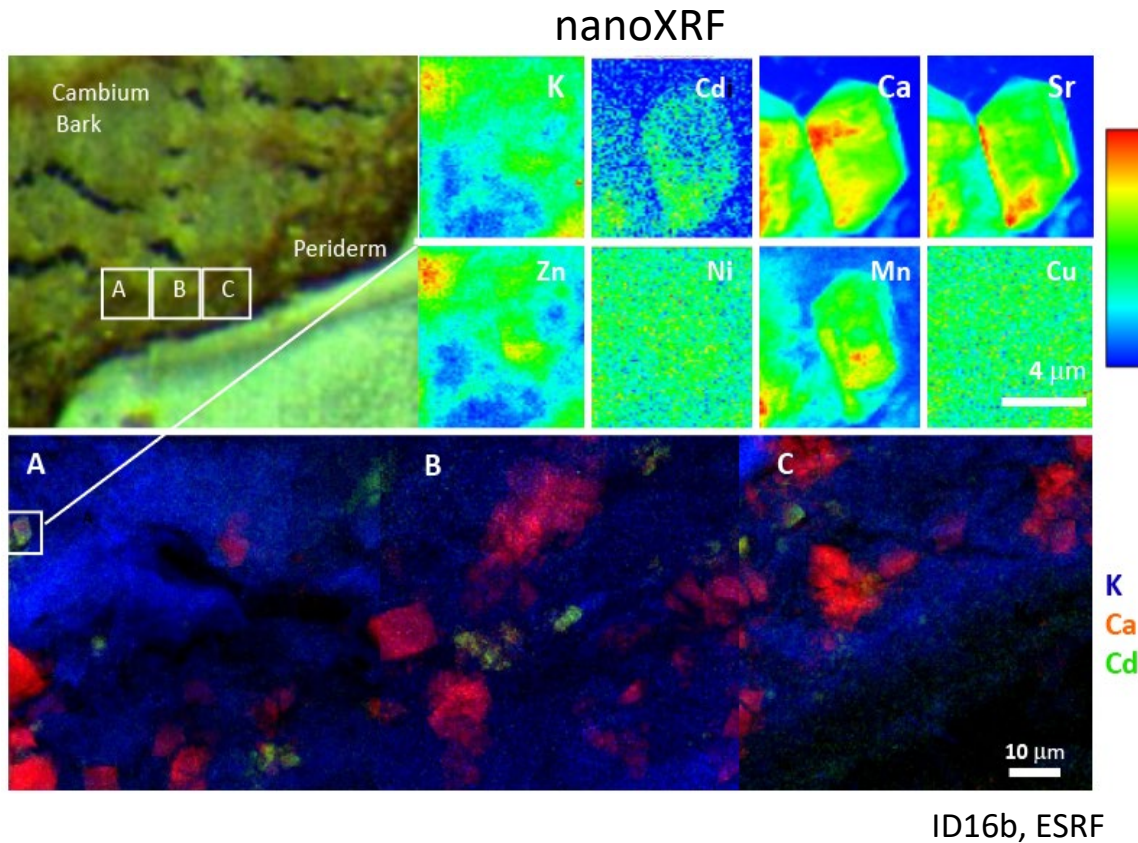


ID21, ESRF

- Spots de Cd colocalisé avec Sr
- Cd diffus dans l'écorce
- Cd dans les vaisseaux sécréteurs

Cd est associé à des cristaux d'oxalate dans les branches (high)

SEM-EDX



Blommaert et al. 2024 Environ. Exp. Botany

Cristaux d'oxalate contenant Sr, parfois Mn, Ni, Cu, et Cd, bien cristallisés ou sous forme d'amas de nanoparticules

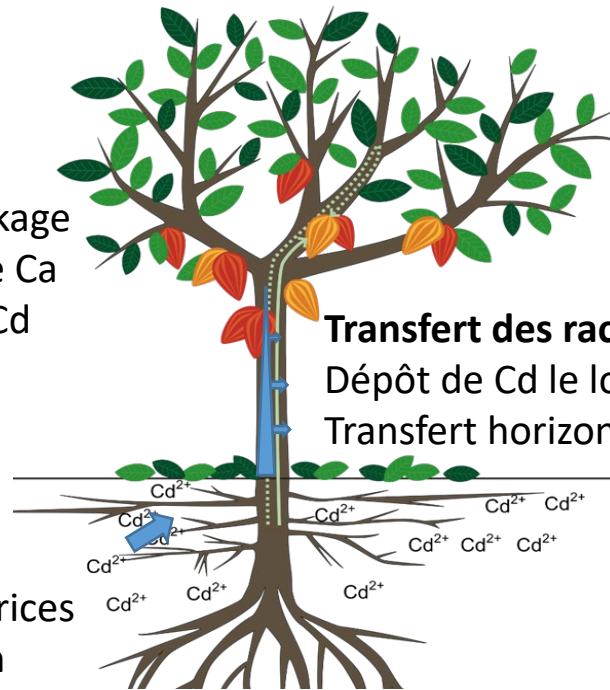
Mécanisme de détoxification des métaux observé dans une hyperaccumulatrice, dans les lichens, les champignons.

Conclusions

Le cacao développe des mécanismes originaux pour faire face à la toxicité du Cd :

Branches : compartiment de stockage principal. Les cristaux d'oxalate de Ca participent à l'immobilisation du Cd

Les variétés fortement accumulatrices se distinguent par une **absorption racinaire élevée**. Plus de transporteurs ? Transporteurs différents ?



Fèves: Cd probablement lié au phytate

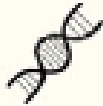
Transfert des racines vers les parties aériennes élevé
Dépôt de Cd le long du xylème,
Transfert horizontal (xylème-phloème)

Potential mitigation strategies

I. Soil amendments



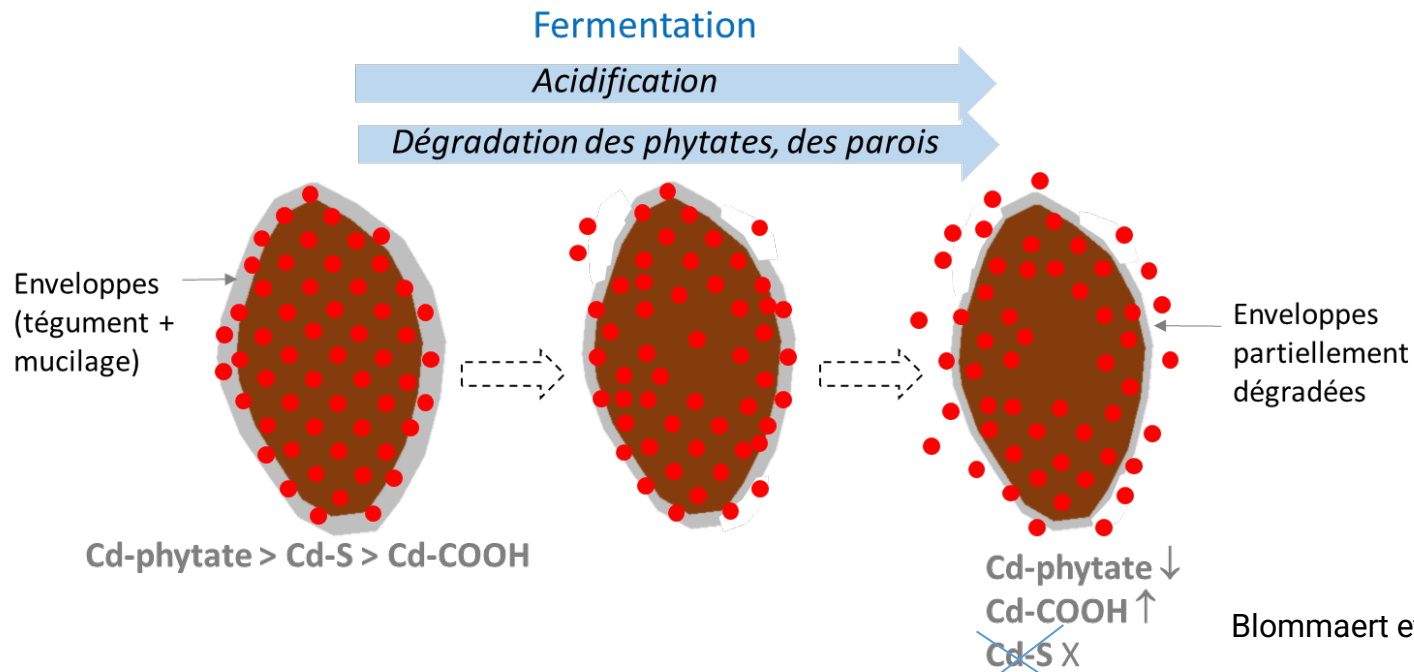
II. Genetics



III. Postharvest



Jusqu'à 30 % de réduction des concentrations de Cd dans les fèves après fermentation



Implications pour les stratégies d'atténuation

I. Soil amendments

Inefficace à court terme car le Cd est déjà à l'intérieur de l'arbre ?
Efficacité à plus long terme à explorer

II. Genetics

Les transporteurs de Cd à l'interface sol-racine sont essentiels.
La production d'oxalate devrait être étudiée plus avant.

III. Postharvest

Lessivage du Cd pendant la fermentation : stratégie prometteuse.
Optimisation nécessaire pour conserver la qualité gustative

Recherches en cours, sur les variétés agronomiques

Rôle de l'oxalate

Effet de la carence en nutriments

Spéciation du Cd avec HERFD-XAS (meilleure sensibilité)

Le chocolat est une source mineure de cadmium dans notre alimentation



Remerciements



Hester Blommaert
Sylvain Campillo, Sarah Bureau
Delphine Tisserand, Simona Denti

Clara de Meese



Erik Smolders
Claudia Moens
Ruth Vanderschueren



FAME,
Olivier Proux, Denis Testemale
Isabelle Kieffer, JL Hazemann
ID21 Hiram Castillo Michel, Giulia Veronesi
ID16B Rémi Tucoulou



Pathmanathan Umaharan
Caleb Lewis
Gideon Ramtahal



SAMBA:
Gautier Landrot
Guillaume Alizon



Eduardo Chavez

ETH zürich Matthias Wigganhauser

Financements

