



Contamination des cultures par les éléments traces

Etat des lieux des connaissances scientifiques

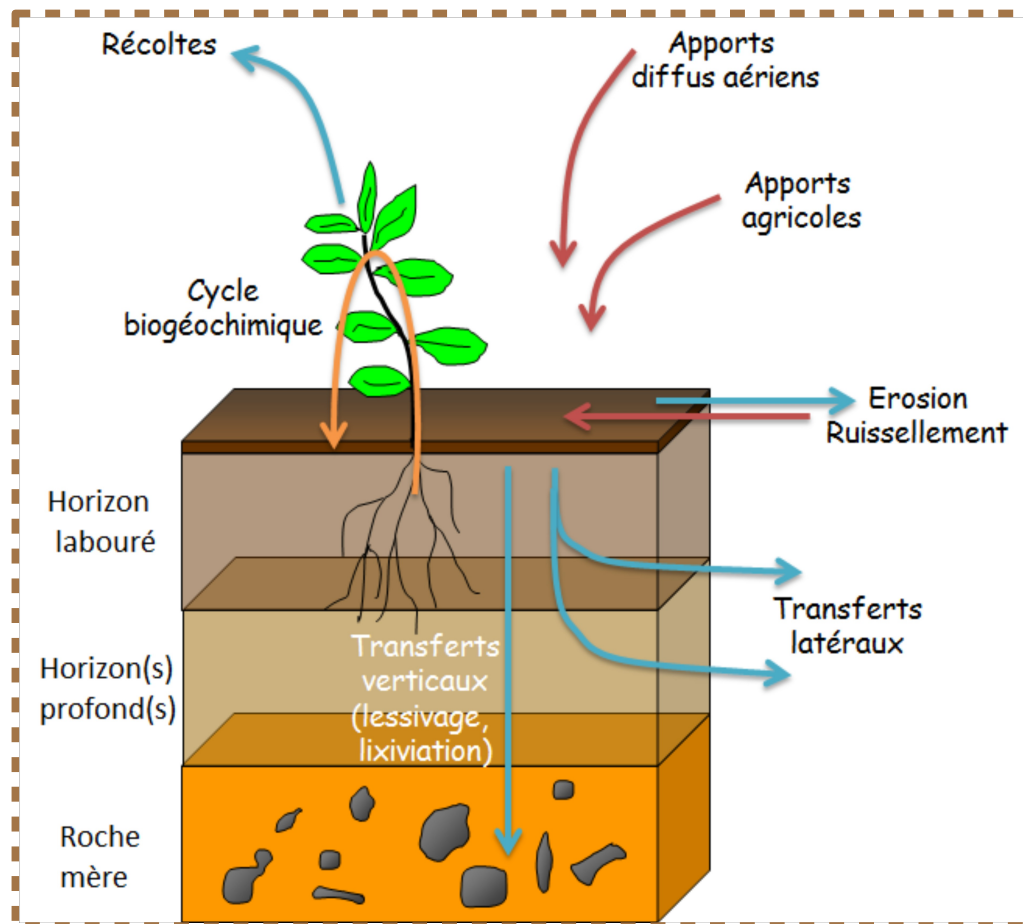
Christophe Nguyen⁽¹⁾, Julien Laurette⁽¹⁾, Jean-Yves Cornu⁽¹⁾, Marie Jacquard⁽²⁾⁽¹⁾, André Schneider⁽¹⁾, Laurence Denaix⁽¹⁾, Valérie Sappin-Didier⁽¹⁾, Dauguet Sylvie⁽³⁾, Bruno Barrier-Guillot⁽²⁾, Emmanuelle Gourdain⁽²⁾ et Benoît Méléard⁽²⁾

(1) INRA UMR 1391 ISPA - Interactions Sol Plante Atmosphère, CS 20032, 33882 Villenave d'Ornon cedex : mël : christophe.nguyen@bordeaux.inra.fr

(2) ARVALIS-Institut du Végétal, Station expérimentale de Boigneville - 91720 Boigneville : mël : b.meleard@arvalisinstitutduvegetal.fr

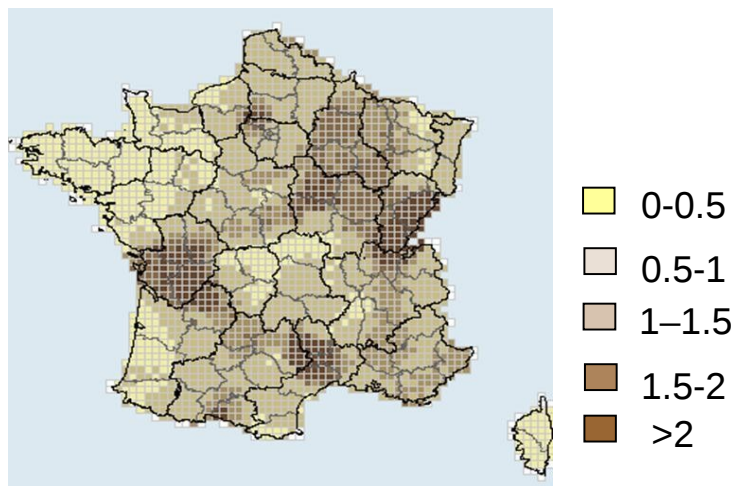
(3) CETIOM, Parc Industriel 33600 PESSAC, France : mël : dauguet@cetiom.fr

La biogéochimie des ETM



- ETM naturellement présents dans les sols en lien avec la pédogénèse (fond pédogéochimique) + apports naturels & anthropiques
 - ETM des plantes = majoritairement l'absorption racinaire

Teneur en Cd total du sol (mg/kg)



Données RMQS

(<http://acklins.oreans.inra.fr/geoindiquasol/index.php>)

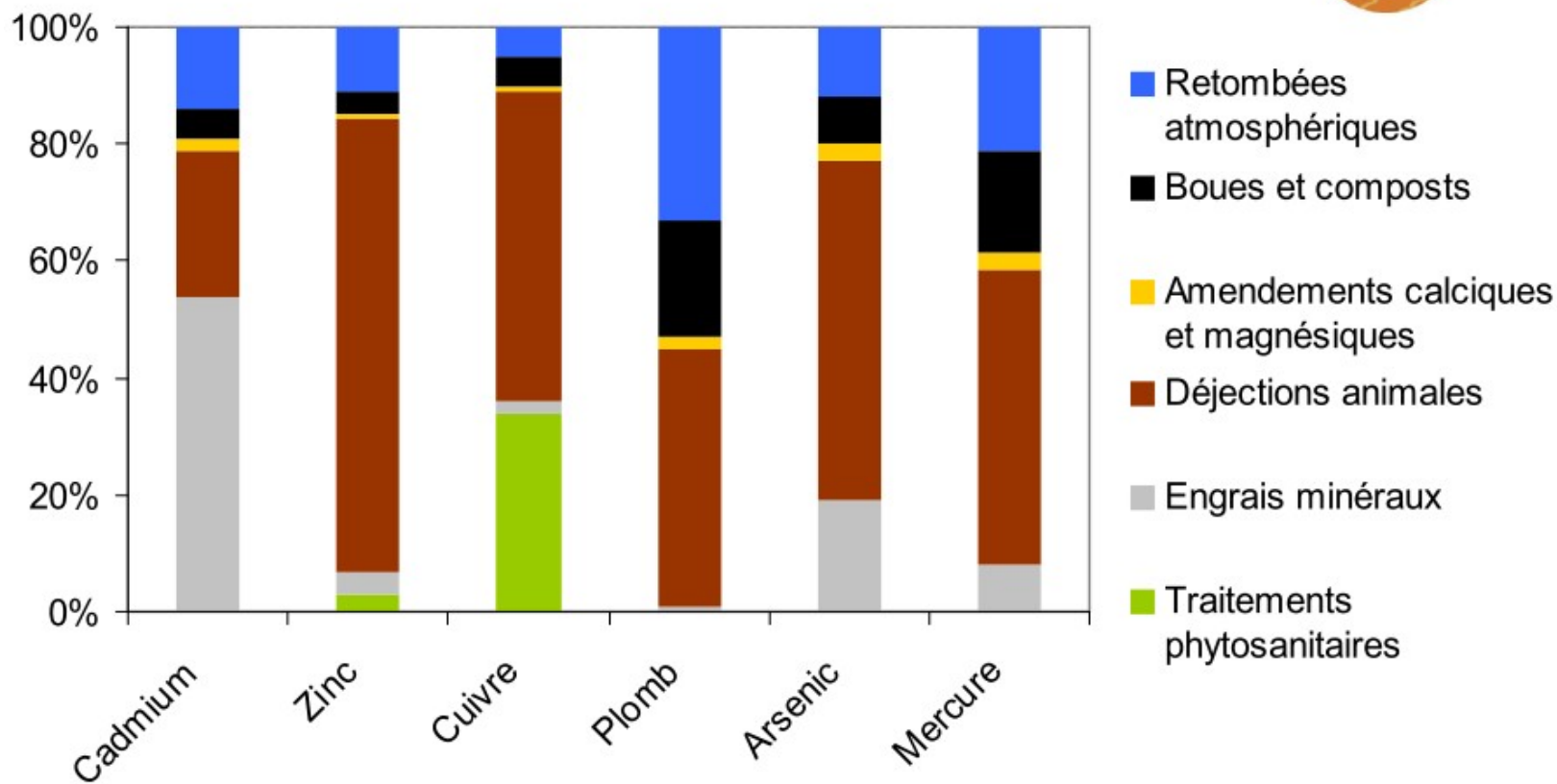
HF	Nb	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Très argileux	61	0,56	99,6	21,5	0,05	53,7	42,2	0,47	126,0
Argileux	284	0,44	73,3	17,0	0,05	36,9	37,1	0,34	100,0
Equilibré	1203	0,30	52,6	13,9	0,05	24,4	28,3	0,21	65,8
Limoneux	1389	0,25	41,7	11,0	0,05	16,3	26,4	0,19	51,0
Sableux	204	0,16	23,9	7,9	0,04	8,7	28,0	0,14	35,0

Tableau 4-9. Analyses HF - Médianes par classes granulométriques.

Baize D., Deslais W. et Saby N., janvier 2007
Teneurs en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les
sols agricoles en France.
Résultats d'une collecte de données à l'échelon national.
Rapport final simplifié.
ADEME. Angers, Convention 0375 C0035
<http://www.gissol.fr/programme/bdetm/bdetm.php>

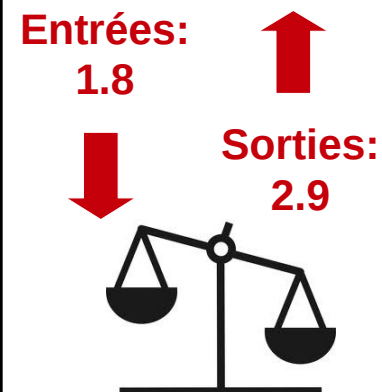
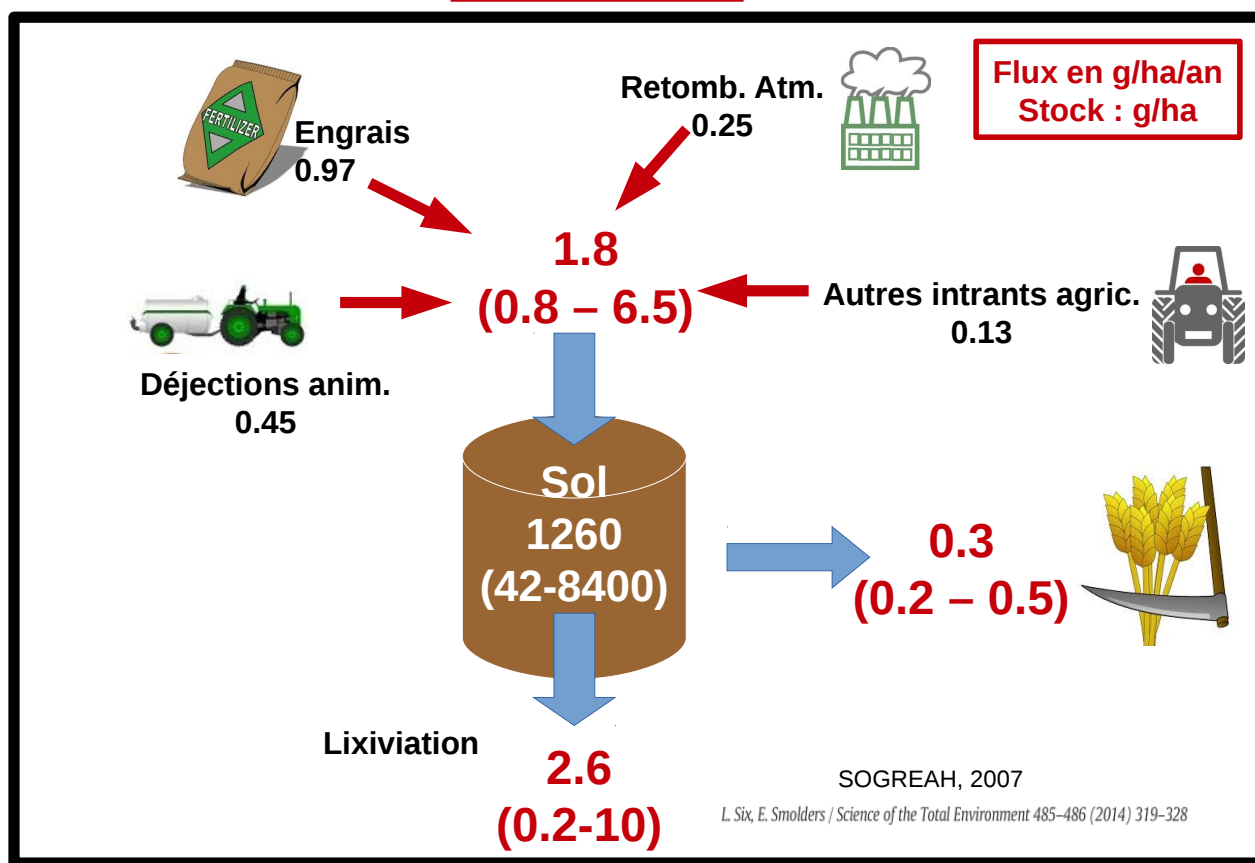
Les intrants agricoles = sources d' ETM pour les sols

Les déjections animales sont une source importante d'ETM avec les engrais et les boues/composts

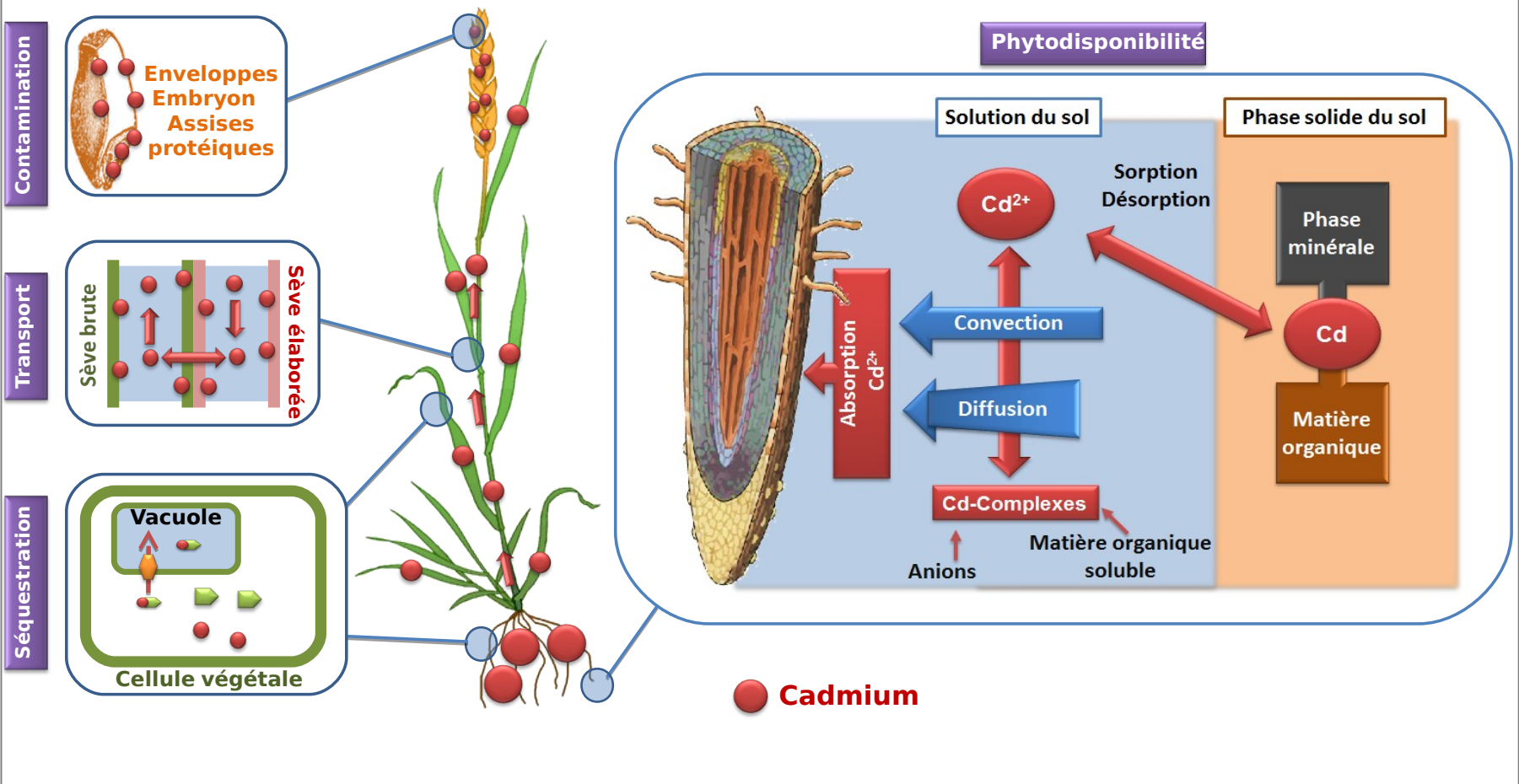


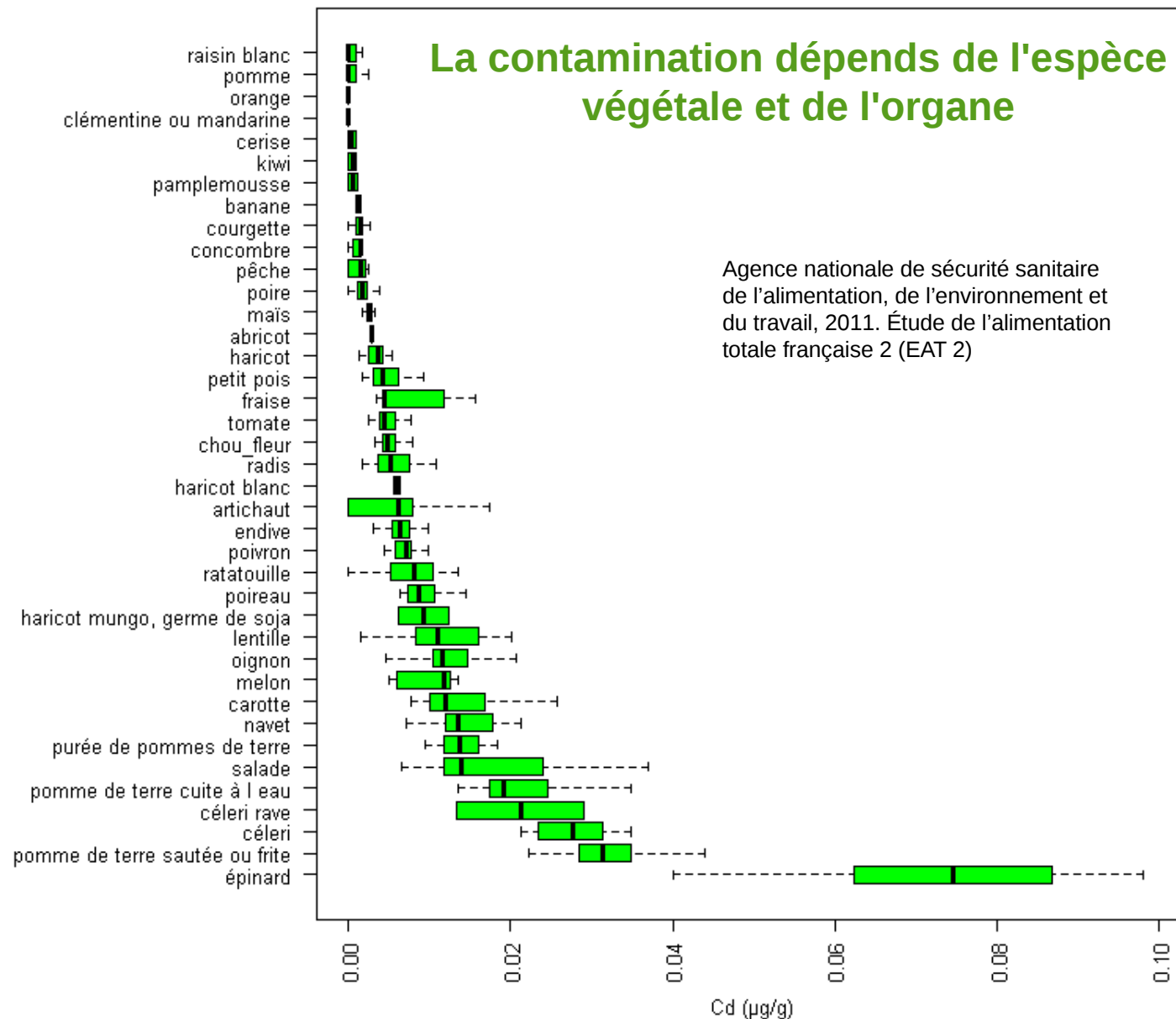
ETM = non dégradables : Etablir des bilans pour estimer l'accumulation des ETM dans les sols

Cadmium



Le transfert sol-plante des ETM (ex. Cd)





Pour un même organe, la contamination dépend de l'espèce végétale

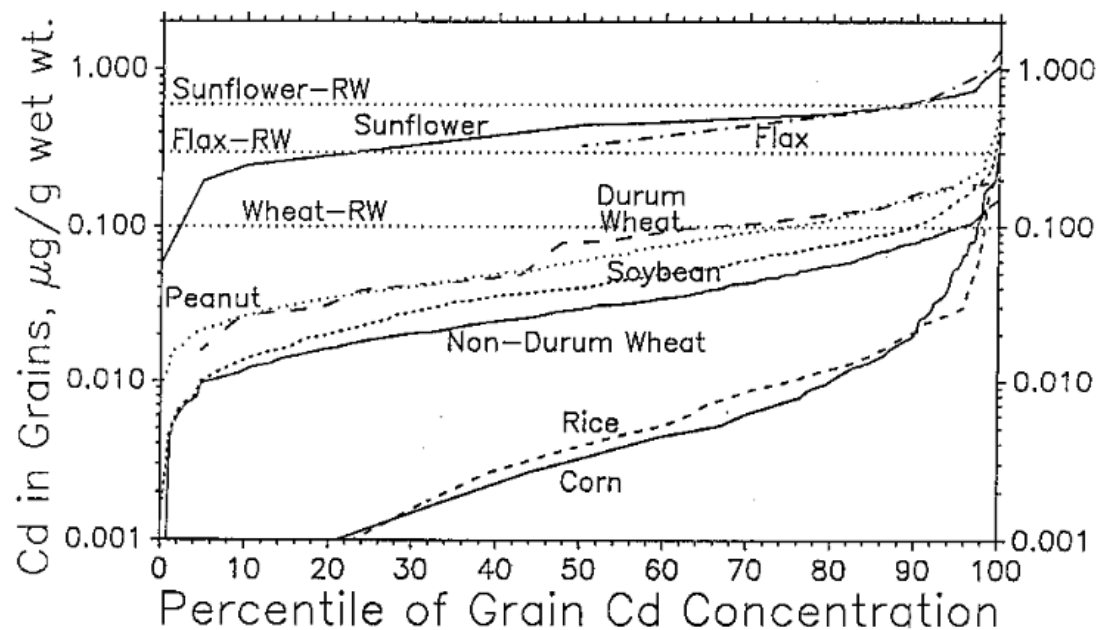
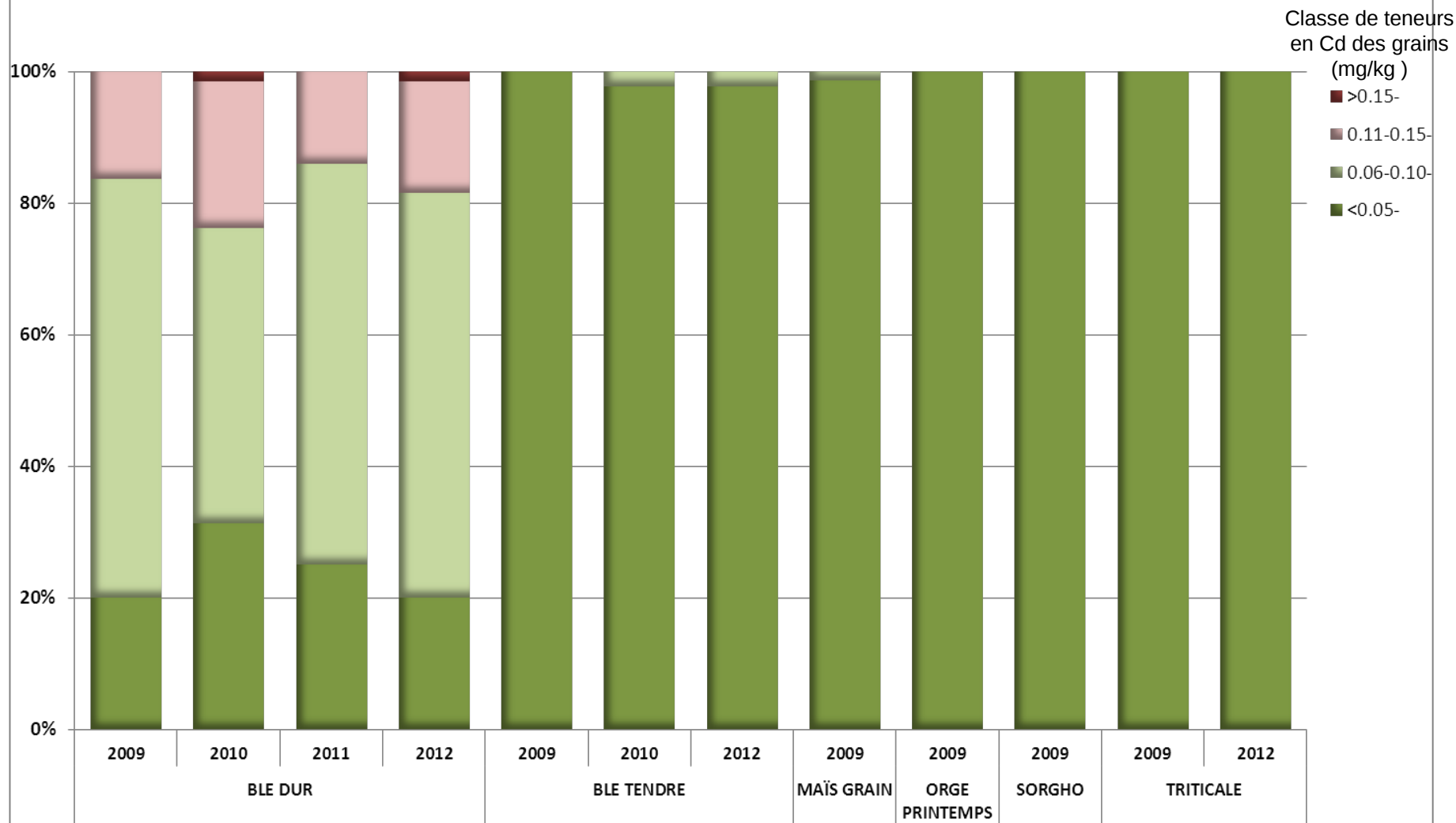


Figure 1. Statistical distribution of cadmium concentration in grain crops. Data for wheat, rice, corn, soybean, peanut from Wolnik et al. (1983, 1985); data for flax from Klein and Weigert (1987); data for sunflower from Ocker et al. (1991). German *Richtwert* (RW) for crops shown with horizontal dotted lines.

Cadmium/ tension variable suivant le type de céréales

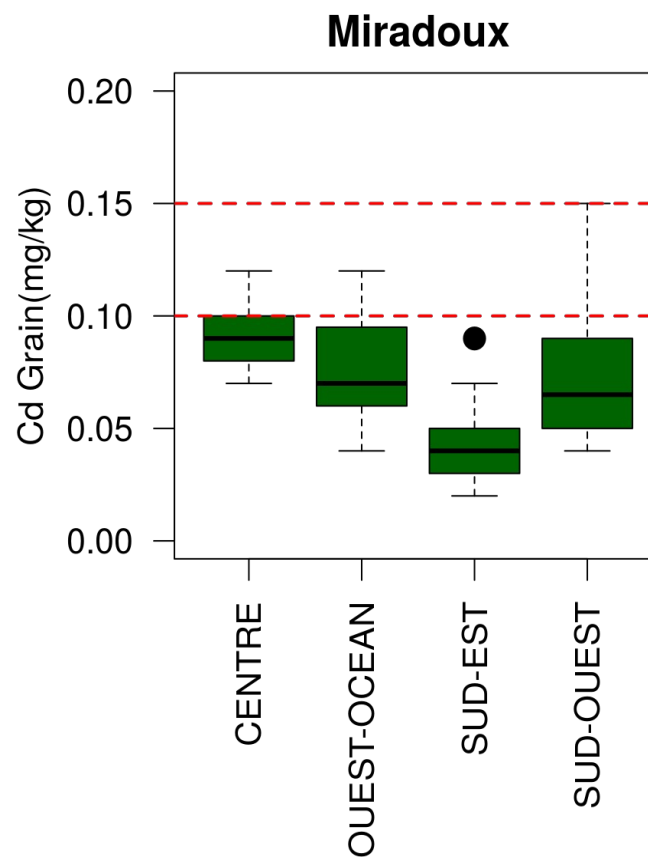
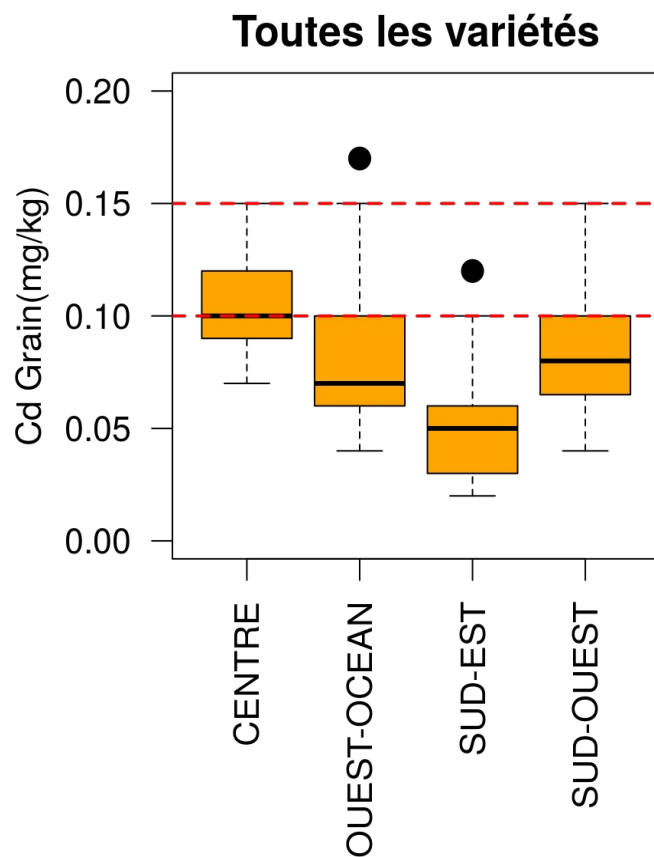


Source : Enquêtes au champ FAM-ARVALIS 2009 à 2012

Cadmium : Tension variable suivant les bassins de production (blé dur)



Enquête, Arvalis-France Agrimer au niveau des organismes collecteurs

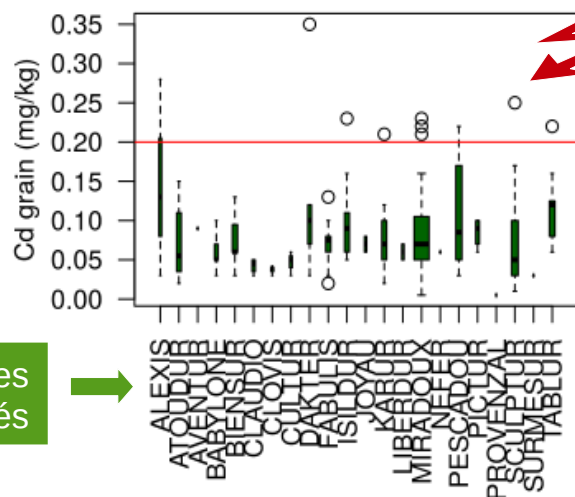
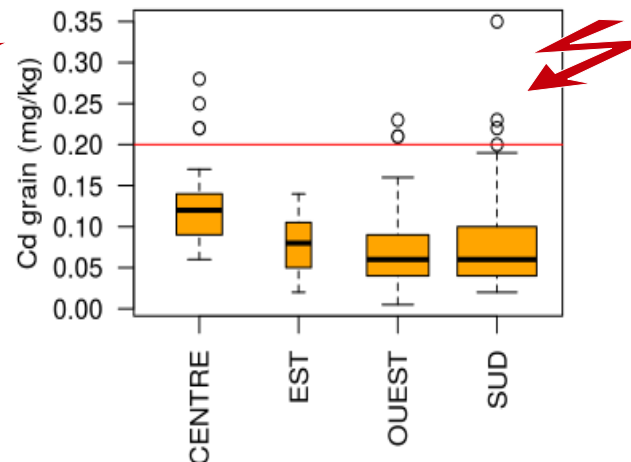
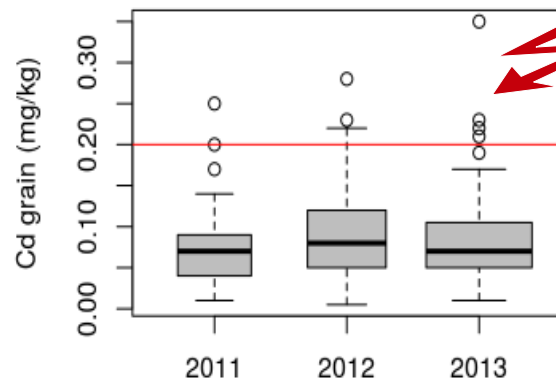


Au niveau des exploitations, une variabilité de la contamination Cd du blé dur difficile à comprendre

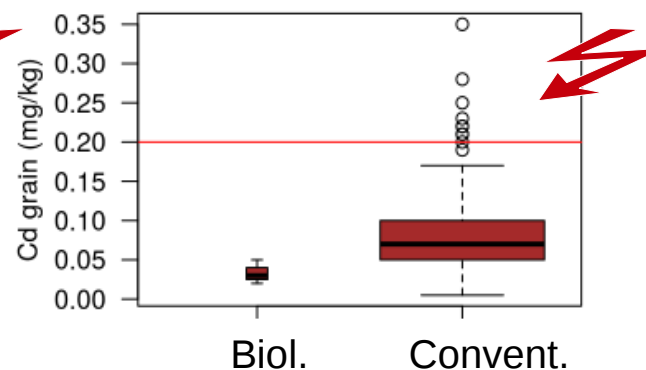


Cadur

Enquête, Arvalis au niveau des exploitations



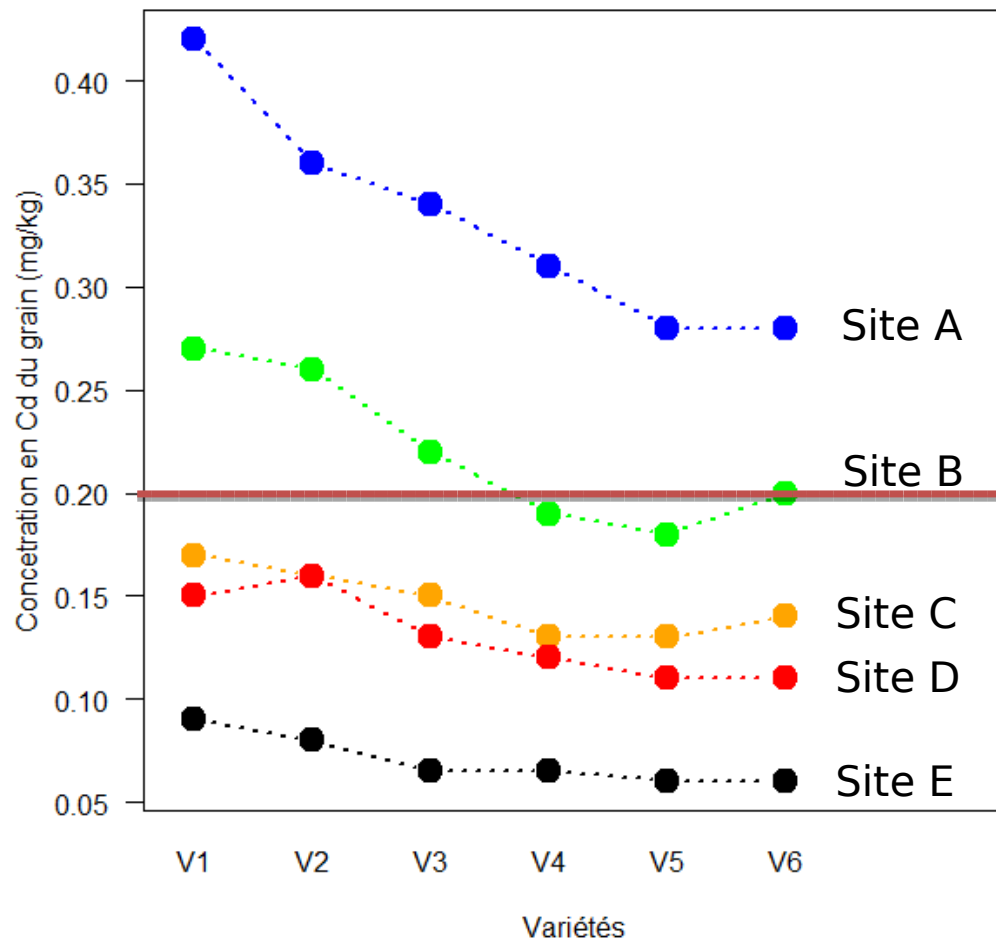
Différentes variétés



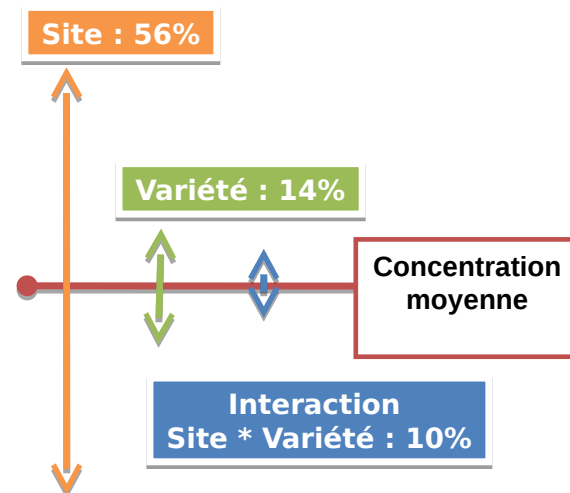
Blé dur : un effet site dominant, suivi par l'effet de la variété



Cadur



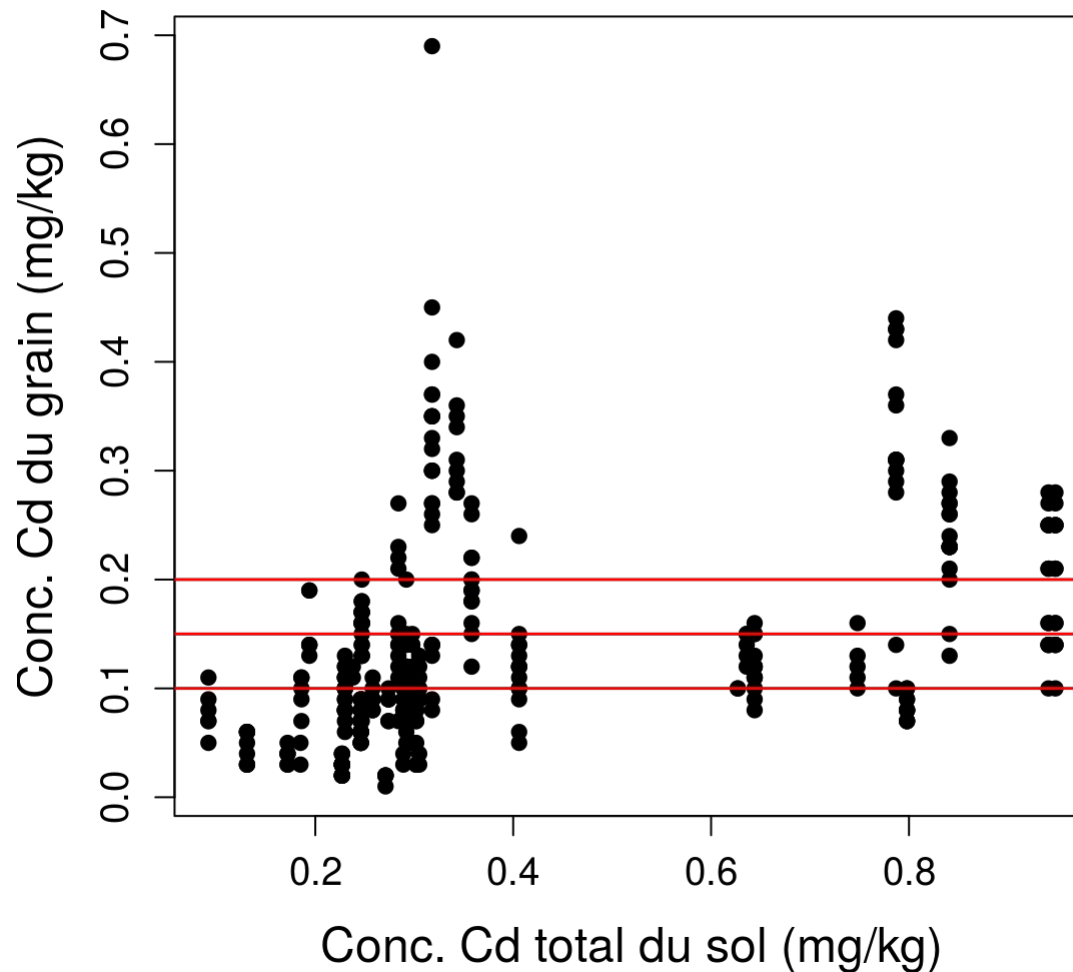
Sources de variation



SEULE, la concentration en Cd total du sol est un (très) mauvais prédicteur de la contamination des plantes : ex grain de blé dur



Cadur



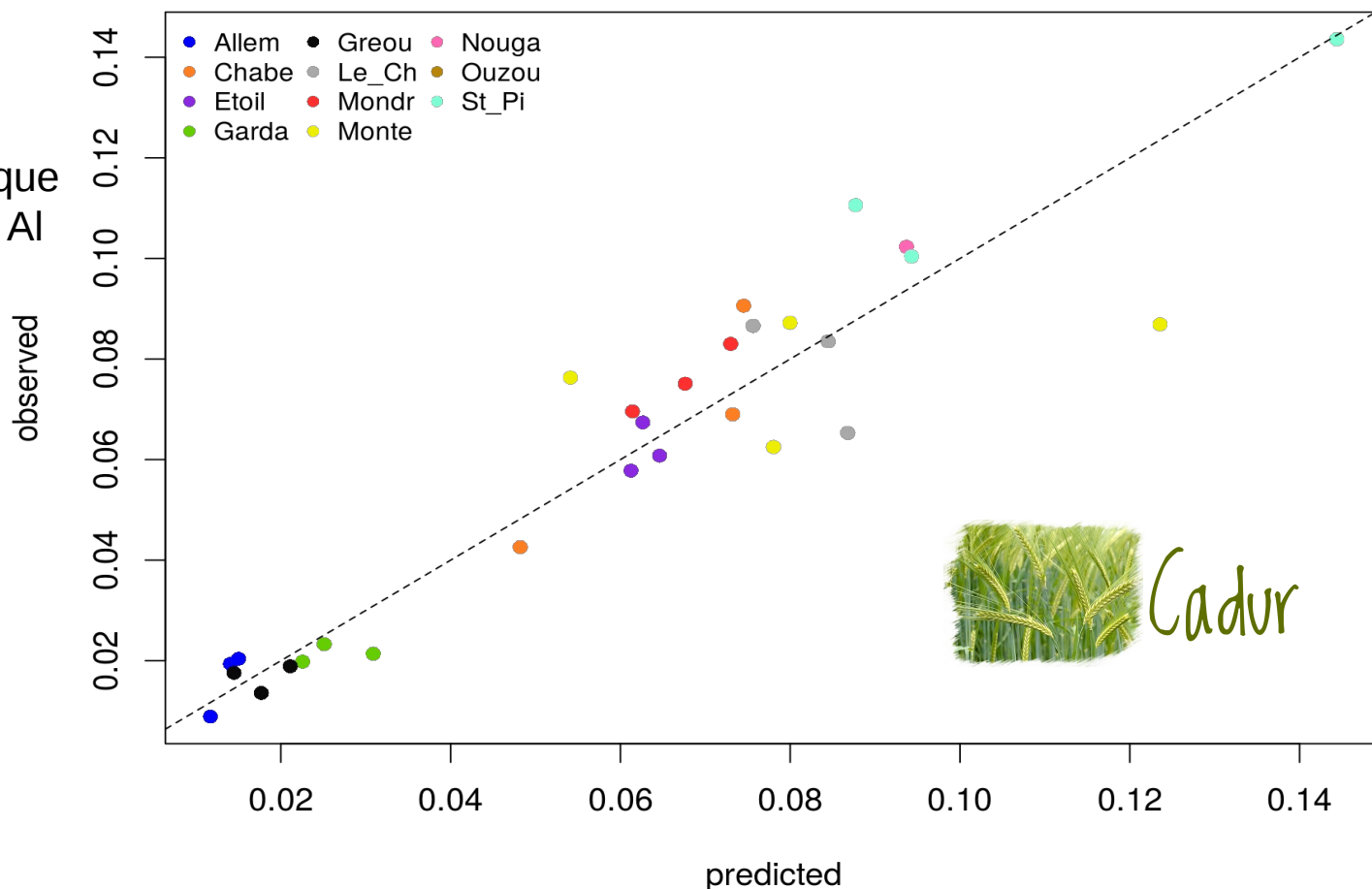
Modèle prédictif de la contamination du grain de blé dur par le Cd à partir de quelques caractéristiques du sol

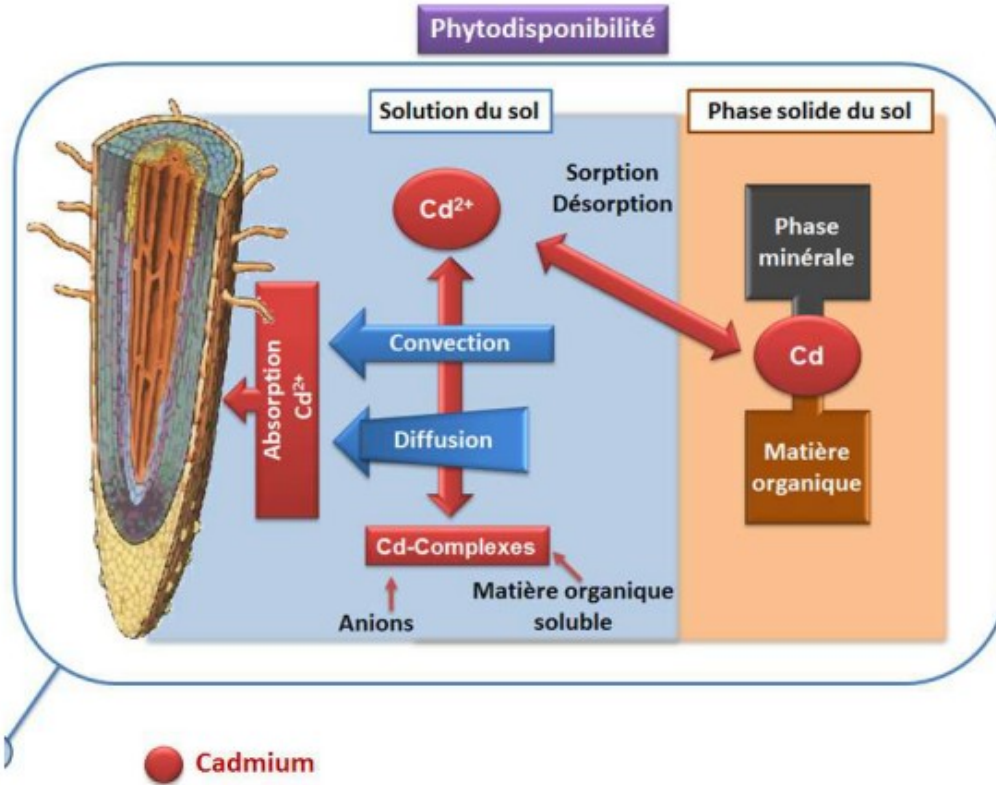
Prédicteurs :

- Teneur du sol en Cd extractible
- CEC
- pH
- Carbone organique
- Oxydes Fe, Mn, Al
- Cl⁻ extractibles

$$\text{Cd grain} = \text{Cd_pyro} + \text{CEC} + \text{pH_eau} + \text{C_tot} + \text{Fe_Tamm} + \text{Mn_Tamm} + \text{Al_Tamm} + \text{Cl_ss}$$

$R^2 = 0.9$





$$\theta \frac{\partial C_M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r f \theta D_M \frac{\partial C_M}{\partial r} + r_0 v_0 C_M \right) + \theta (k_d C_{ML} - k_{a(\text{cond})} C_M C_L) + (k_{\text{desM}} C_{MS} - \theta k_{\text{adsM}} C_M)$$

$$\theta \frac{\partial C_{\text{ML}}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r f \theta D_L \frac{\partial C_{\text{ML}}}{\partial r} + r_\theta v_0 C_{\text{ML}} \right) + \theta \left(k_{a(\text{cond})} C_M C_L - k_d C_{\text{ML}} \right) \left(k_{\text{desML}} C_{\text{MLS}} - \theta k_{\text{adsML}} C_{\text{ML}} \right)$$

$$\theta \frac{\partial C_L}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r f \theta D_L \frac{\partial C_L}{\partial r} + r \theta v_0 C_L \right) + \theta \left(k_d C_{ML} - k_{a(\text{cond})} C_M C_L \right) \left(k_{\text{desL}} C_{LS} - \theta k_{\text{adsL}} C_L \right)$$

Modélisation de la phytodisponibilité

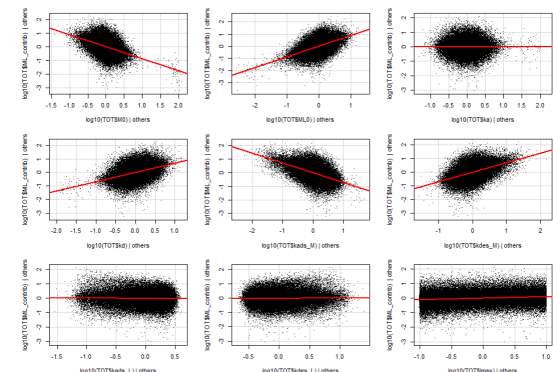
- Modélisation des processus
- Simulations numériques
- Analyse de sensibilité,
- Compréhension des mécanismes
- Classement des variables

ANR- 2011 CESA 008 01



Simulateur numérique de l'accumulation par les cultures des éléments **traces** minéraux (ETM) contaminants du sol

2012-2015



ANR- 2011 CESA 008 01

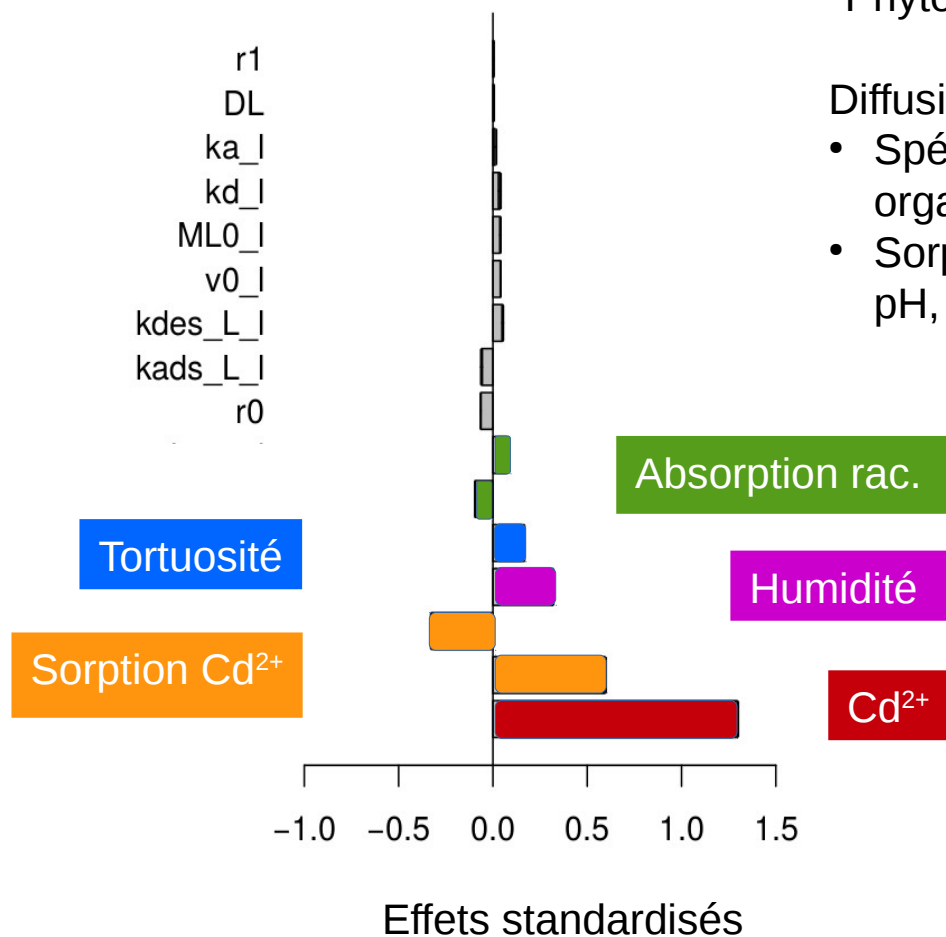


Modélisation de la phytodisponibilité

Phytodisponibilité du Cd sols agricoles français :

Diffusion de l'ion libre vers la racine =

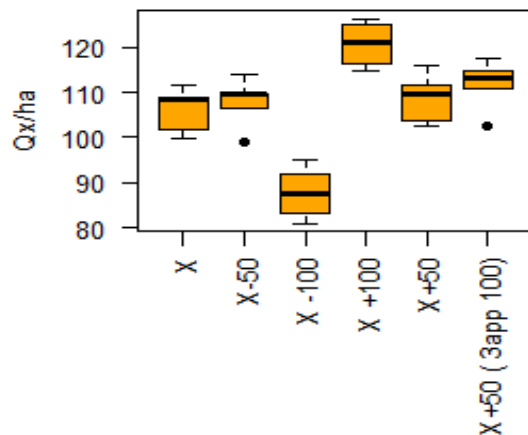
- Spéciation du Cd en solution : matière organique soluble, pH, Ca
- Sorption : matière organique, texture, oxydes, pH, ions compétiteurs



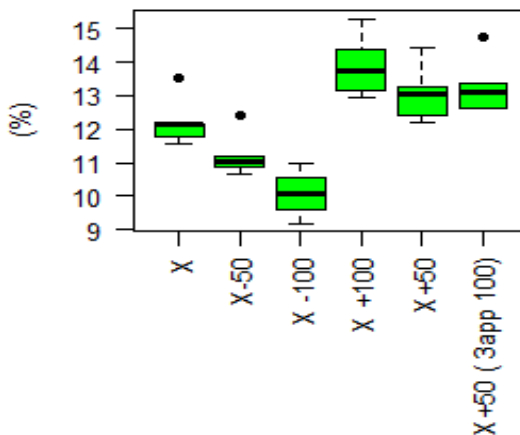
Lin et al. 2015 en révision

Effet de la fertilisation N sur la teneur en Cd du grain de blé dur : modification de la phytodisponibilité ?

Rendements



Taux protéines

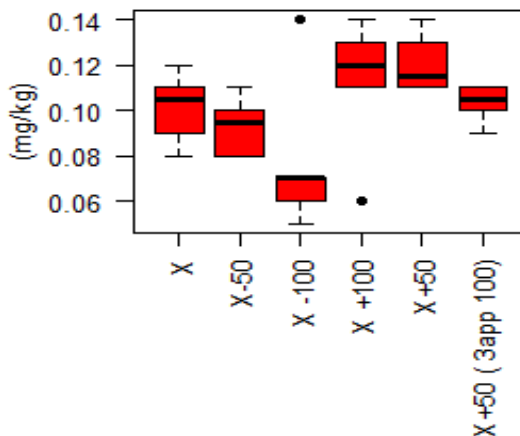


Cadur

Effet de la fertilisation (hypothèses):

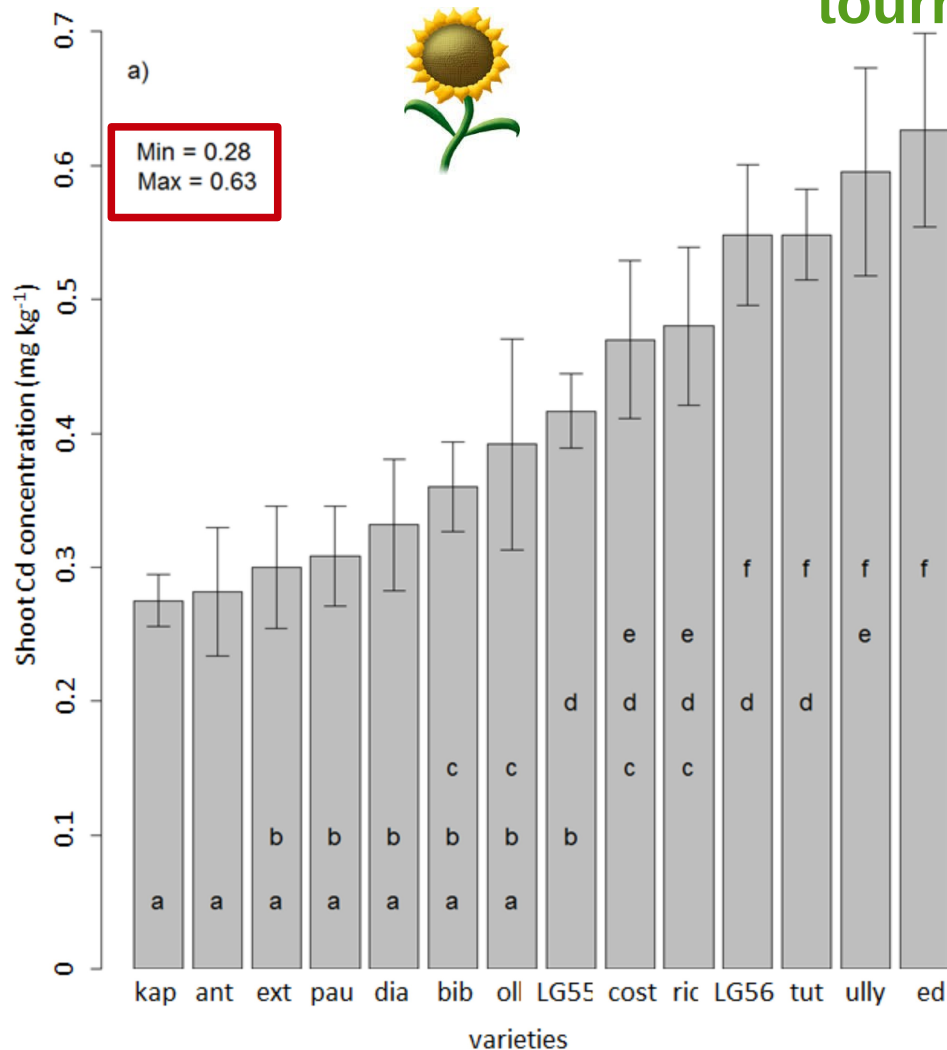
- PH
- Compétition pour la sorption → mise en solution du Cd

Cd grain 2



Compromis entre
{rendement ; taux de protéines}
et la teneur en Cd ?
ou
Fractionnement des apports

Variabilité d'accumulation du Cd dans les tissus aériens du tournesol



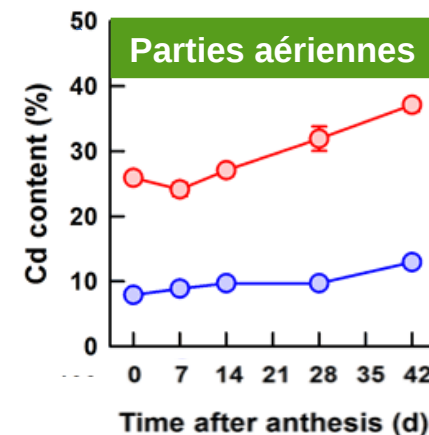
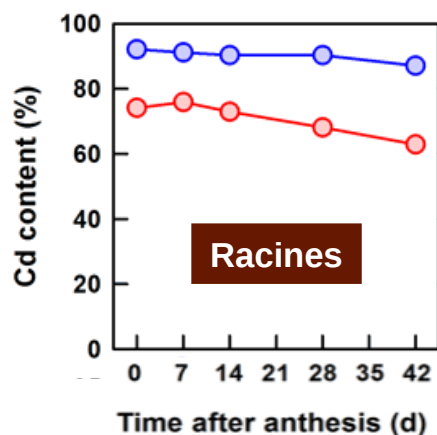
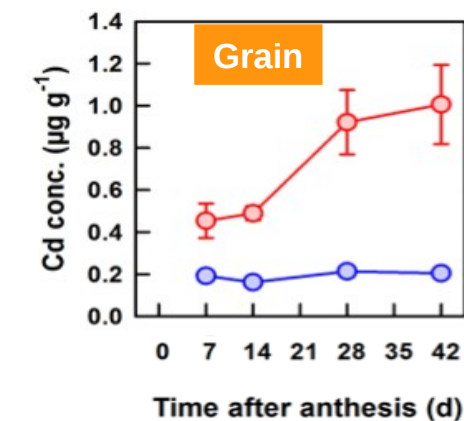
14 variétés de tournesol cultivées
en solution nutritive à 20 nM Cd,
stades 10-12 feuilles

(Laporte et al., 2015 thèse INRA-Cetiom)

Différence d'allocation du Cd au sein de la plante

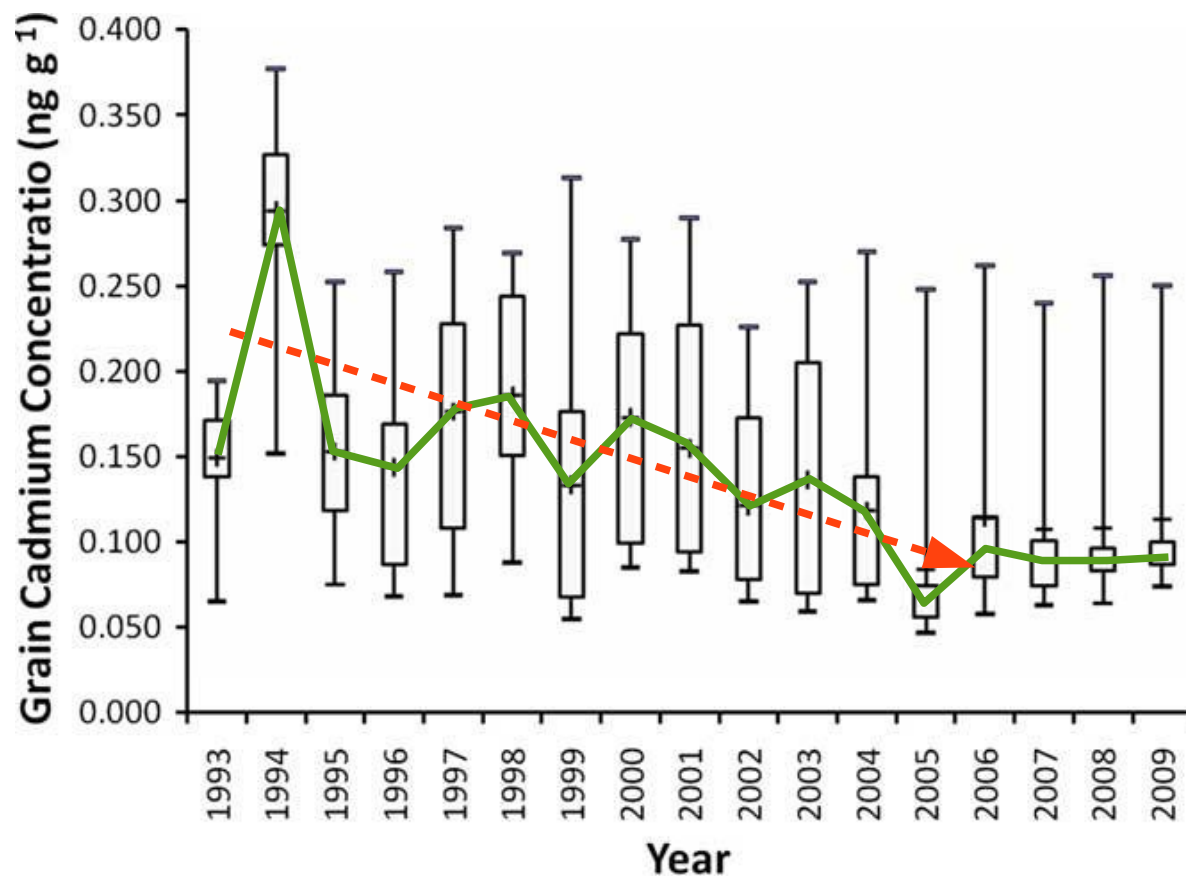
Deux variétés de blé dur accumulant différemment le Cd dans le grain

- **Fortement accumulatrice**
- **Faiblement accumulatrice**



Cadmium uptake and partitioning in durum wheat during grain filling. Harris NS and Taylor GJ (2013) BMC Plant Biology 13:103

Apport des programmes de sélection variétale : exemple du blé dur et du cadmium au Canada



Clarke, J.M., Clarke, F.R., Pozniak, C.J., 2010. Forty-six years of genetic improvement in Canadian durum wheat cultivars. Canadian Journal of Plant Science 90, 791–801. doi:10.4141/cjps10091

Origine de la variabilité variétale d'accumulation du Cd : Séquestration racinaire

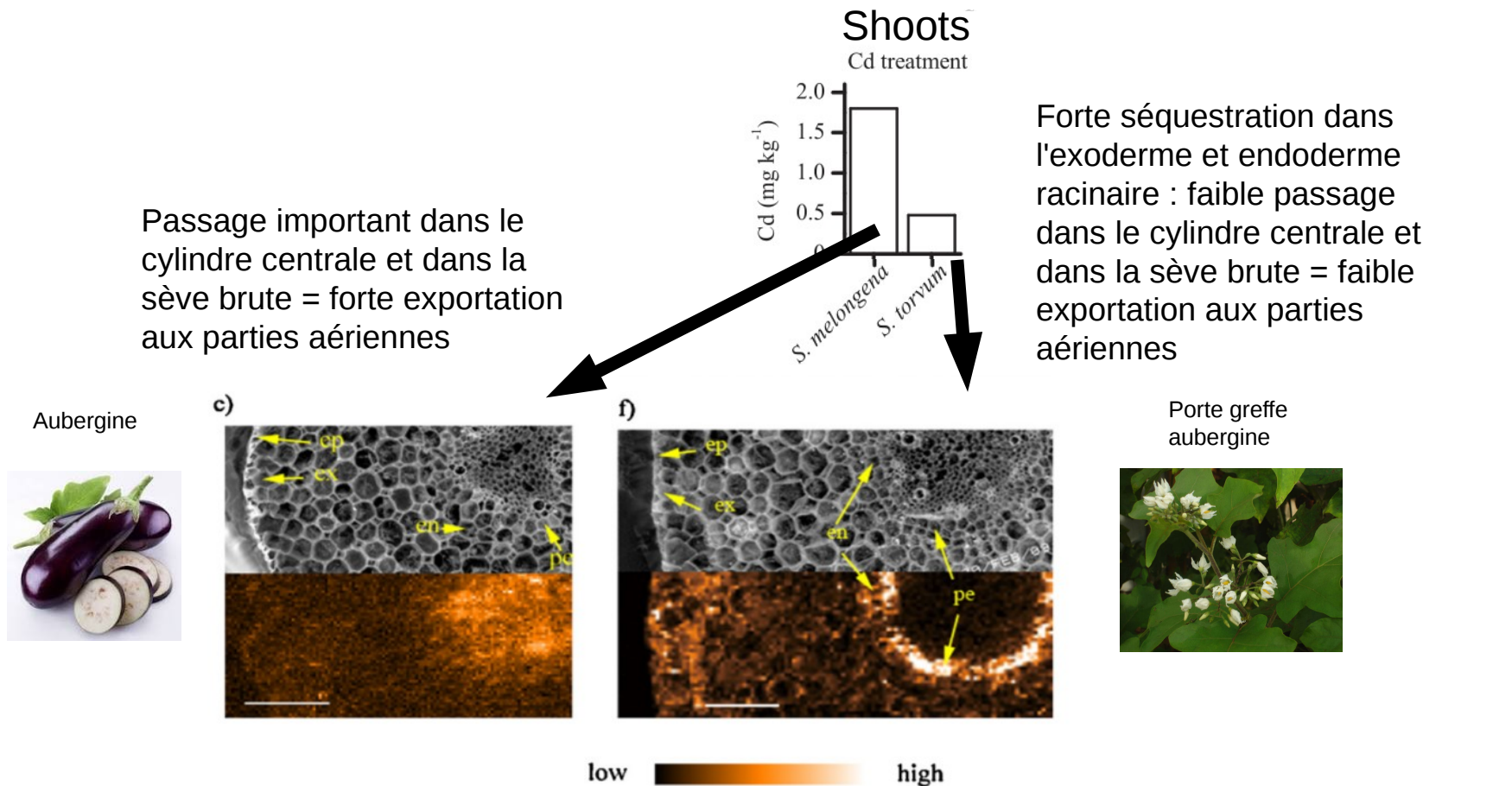
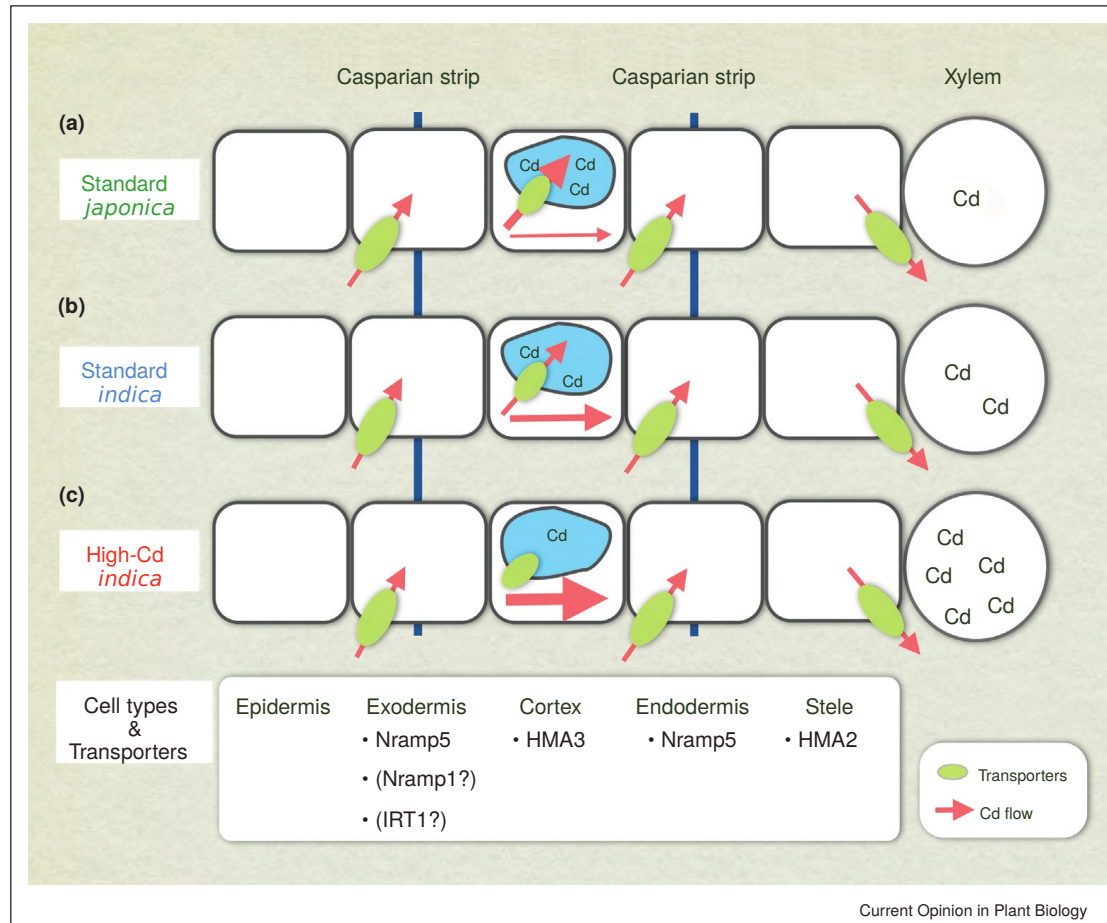


Fig. 2. SEM images and SXRF elemental maps of Cd in Cd-treated *S. melongena* (a–c) and *S. torvum* (d–f) root cross sections taken at 10 (a and d), 30 (b and e) and 40 mm (c and f) above the root apex. Note that root cross sections taken at 30 mm above the root apex were analyzed at different beamtimes from the root sections taken at 10 and 40 mm above the root apex. Scale bars represent 100 μ m. ep, epidermis; ex, exodermis; en, endodermis; and pe, pericycle.

Yamaguchi et al., 2011.

doi:10.1016/j.envexpbot.2010.12.002

Séquestration racinaire : Caractérisation génétique des transporteurs cellulaires impliqués



Des transporteurs plus ou moins actifs stockent le Cd dans les vacuoles et chargent le xylème

Zone chromosomique impliquée chez le blé dur identifiée : Cdu1 (Wiebe et al., 2010)

Besoins de recherche / développements techniques

Phytodisponibilité

Identification et modélisation des processus dominants en relation avec les types de sols, les pratiques → Elaboration et test de modèles de prédiction au champ (test de scénario, diagnostic)

Ecophysiologie végétale

Poursuite de l'identification des causes physiologiques de la variabilité d'accumulation entre variétés → Développer des programmes de sélection variétale

Interaction génotype environnement : comprendre les variations d'accumulation pour une variété en fonction de son environnement → Intégration des connaissances dans les modèles de prédiction opérationnels

En complément

Perspectives agricoles n° 408, Décembre 2013

LES INNOVATIONS | DANS LES TUYAUX



« La concentration en cadmium est généralement plus élevée dans les racines que dans les feuilles et les tiges. »

En raison des mécanismes de séquestration, la concentration en cadmium est généralement plus élevée dans les racines que dans les feuilles et les tiges, elles-mêmes plus riches que les fruits et les graines. Les légumes feuilles sont donc souvent plus riches en cadmium que les légumes fruits. Dans le grain, la répartition du cadmium n'est pas non plus homogène. Il

Une toxicité difficile à déceler sur les plantes

Le cadmium n'a pas de fonction reconnue vitale pour la plante. Au contraire, il lui est toxique à faible dose car il altère le fonctionnement des enzymes essentielles impliquées par exemple dans la synthèse de la chlorophylle et l'assimilation de l'azote. Cette toxicité se traduit par une réduction de croissance racinaire et aérienne, un épaississement des racines et par des chloroses et nécroses sur les feuilles. La plupart des plantes ont toutefois une tolérance basale au cadmium qui leur permet de l'accumuler à des concentrations potentiellement dangereuses pour l'alimentation humaine et animale sans montrer de symptôme évident de toxicité.

s'accumule préférentiellement avec les protéines, à savoir dans l'embryon et la couche à aleurone située sous le tégument. Les concentrations de cadmium dans l'endosperme (le tissu contenant l'amidon) sont donc souvent plus faibles.

Réduire la contamination en cadmium des grains ?

Dans le contexte actuel de durcissement de la réglementation (voir encadré), ces résultats incitent à envisager des stratégies pour limiter le transfert du cadmium vers le grain. Deux leviers d'actions sont possibles : intervenir sur la physiologie de la plante mais aussi sur la phytodisponibilité du cadmium du sol. Il faut ainsi caractériser le potentiel d'accumulation des variétés actuelles, travailler la sélection génétique pour obtenir des variétés peu accumulatrices tout en conservant les qualités de productivité et de valeur d'usage. En effet, chez les céréales et les oléagineux, l'accumulation de cadmium dans le grain varie significativement entre variétés, d'un facteur 2 à 5 suivant l'espèce. Chez le blé dur et le riz, cette variabilité d'accumulation ne provient pas

SÉQUESTRATION DU CADMIUM : un transfert limité vers les grains

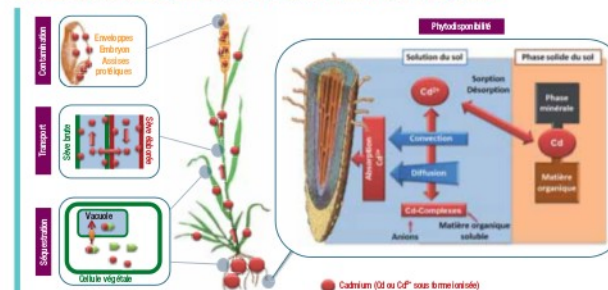


Figure 2: Les processus majeurs gouvernant la contamination du grain de blé dur par le cadmium.

Remerciements :



Département Environnement & Agronomie INRA



Arvalis Institut du végétal : projet Cadur et thèse sur la modélisation de la phytodisponibilité



Cetiom : thèse MA Laporte sur l'accumulation du Cd chez le tournesol

ANR CESA 2011 008 01 SimTraces



RMT Quasaprove et Casdar Multicontaminations

Equipe technique & administrative UMR 1391 ISPA, Biogéochimie des éléments traces (BiogET)

Sylvie Bussière
Cécile Coriou
Thierry Robert
Stéphane Thunot

Françoise Prud'Homme
Corinne Sert

Chercheurs sur CDD : MA Laporte, Z. Lin, R. Bakoto, F. Perrier