

BLÉSSÛR : UN OUTIL DE PRÉDICTION DU RISQUE DE NON-CONFORMITÉ DU BLÉ DUR VIS-À-VIS DE SA TENEUR EN MÉTAUX LOURDS

Nguyen¹ Christophe, Saby Nicolas², Roucou Agathe³, Cornu Jean-Yves¹, Méléard Benoît³

1 : UMR ISPA Inrae BSA, Centre de Bordeaux Aquitaine

2 Infosol, Inrae, Orléans

3 : Arvalis Institut du Végétal, Station expérimentale de Boigneville

I. Les éléments traces du sol (ET)

Les éléments traces sont des éléments chimiques de la famille des métaux et métalloïdes. Ceux dont la densité est $> 5 \text{ g/cm}^3$ sont appelés **métaux lourds**. Ces éléments sont présents dans l'environnement à des concentrations normalement faibles inférieures à 100 mg/kg (notion de 'traces'). La notion de contaminant est liée à une altération de la qualité du milieu, notamment en lien avec un risque pour les organismes vivants. La notion de pollution est quant à elle plutôt employée lorsque les effets délétères sont avérés.

Les ET sont naturels et sont issus de la formation de la terre. Dans les sols, ils proviennent :

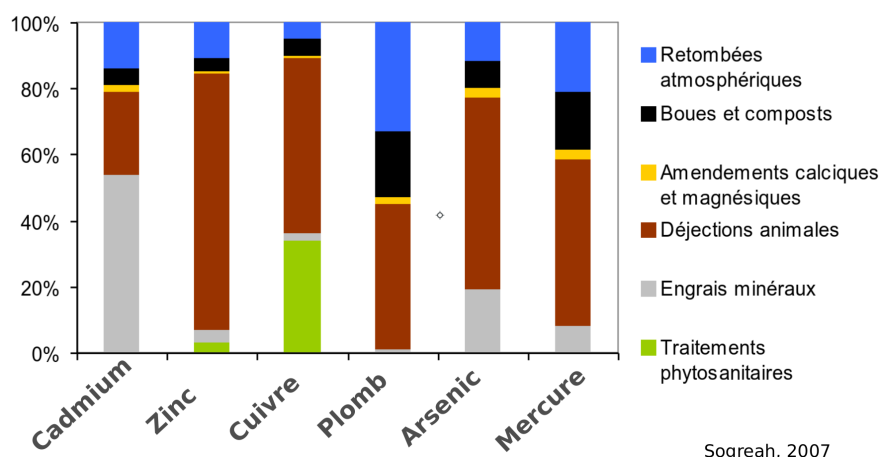
- du processus de formation des sols (pédogénèse) par altération des roches mères et par sédimentation : c'est le **fond pédogéochimique**
- des apports par :
 - retombées atmosphériques d'ET liées au volcanisme aux activités industrielles, poussières d'érosion éolienne
 - les intrants agricoles (fertilisants, amendements, traitements phytosanitaires) où ils sont la matière active (cuivre) ou des contaminants (cadmium, arsenic, plomb)
 - diverses sources d'origines anthropiques (déchets industriels dont ceux des exploitations minières, émissions liées aux transports, etc.)

Pour la France, le tableau 1 donne la médiane et le 90^{ème} percentile de la teneur totale pour 6 ET dans les sols Français. Comme il sera expliqué plus loin, la teneur totale d'un sol en ET n'est pas directement liée à la biodisponibilité.

Tableau 1 : Teneurs en 6 ET dans les horizons superficiels des sols Français (0-30 cm prélevés sur 2059 sites répartis sur une grille de maille 16 x 16 km couvrant le territoire). Teneurs totales obtenues par dissolution à l'acide fluorhydrique+acide perchlorique (NF ISO 14869-1). Valeurs exprimées en mg /kg de sol sec. Données issues du GIS Sol Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (<https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmq-s-34>) (Saby et al., 2009)

	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	Cadmium	Cobalt	Chrome	Cuivre	Nickel	Plomb	Zinc
(mg /kg de sol sec)							
Médiane	0.19	8.79	47.33	13.40	18.60	27.59	61.40
90 % des sols < à	0.61	18.22	86.52	33.65	44.14	48.94	125.00

La figure 1 illustre l'importance relative des différentes sources d'ET entrant dans les sols agricoles français, montrant que les sources majeures diffèrent suivant les éléments. On retrouve l'importance des engrais phosphatés pour le Cd et les traitements phytosanitaires de type bouillie Bordelaise pour le Cu. Les déjections animales sont une source importante pour beaucoup d'ET.



Sogreah, 2007

Figure 1 : Sources de 6 ET entrant dans les sols agricoles Français d'après l'étude conduite par Sogreah pour le compte de l'Ademe (Sogreah, 2007)

II . Essentialité et toxicité des ET

Les ET comprennent les **oligoéléments essentiels** aux organismes vivants (Cu, Fe, Mo, Zn, Mn, etc.) et des **éléments non-essentiels sans fonction biologique confirmée** (Pb, Cd, ...)(Figure 2). Les ET non-essentiels sont toxiques pour des niveaux d'accumulation bien inférieurs à ceux des oligoéléments. Par exemple, en moyenne, à partir d'environ 10 mg Cd/ kg de matière sèche, une plante verra sa croissance fortement impactée avec des signes visibles de toxicité (nécrose). Pour observer les mêmes effets pour le zinc, il faudra des teneurs de l'ordre de plus de 150 mg Zn/kg (Macnicol et Beckett, 1985). Les oligoéléments peuvent eux aussi devenir toxiques. L'exemple le plus significatif en agriculture est l'excès dans les sols de cuivre issus des traitements phytosanitaires (fongicides à base de cuivre comme la bouillie Bordelaise). Des cas de toxicité du cuivre sur céréales implantés sur d'anciens sols de viticulture ont ainsi été observés dans le sud-est de la France. Certaines espèces de plantes dite hyperaccumulatrices peuvent accumuler dans leurs tissus aériens des quantités très élevées jusqu'à des teneurs de 1 % (Rascio et Navari-Izzo, 2011).



Eléments Traces

Naturels - Ne se dégradent pas

Concentrations environnementales: 0.1% mg/kg

Métaux lourds >5 g/cm³

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Figure 2 : ET oligoéléments pour les végétaux, les animaux et ceux posant des problèmes environnementaux fréquents.

III. Le transfert sol-plante des ET et les enjeux agronomiques

La plante absorbe les ET généralement sous la forme d'ion libre (Cd^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , etc.), dont la concentration à la racine est régie par de nombreux mécanismes en interaction, qui sont les mêmes pour les contaminants et les oligoéléments. Ces mécanismes sont: le transport vers la racine par diffusion et advection avec l'eau absorbée par la plante, la complexation des ET en solution avec des ligands organiques ou inorganiques, la sorption sur la phase solide avec des énergies de liaison variables, la précipitation/dissolution, l'oxydoréduction (Figure 3). L'humidité du sol, sa teneur en argiles, limons et oxyhydroxydes de fer, d'aluminium, de manganèse, sa teneur en matière organique, la nature de cette dernière et la présence de cations compétiteurs dont le proton (pH) sont les facteurs majeurs influant la disponibilité des ET. La teneur totale d'un sol en ET n'est donc généralement pas suffisante pour prédire la biodisponibilité qui est un phénomène complexe.

La grande majorité de l'absorption des ET par les plantes se fait par le système racinaire. L'absorption foliaire est limitée sauf en cas de fertilisation foliaire. L'absorption racinaire des ET peut être passive mais la majorité est assurée par des canaux ou transporteurs cellulaires dont le manque de spécificité conduit à ce que les contaminants soient également absorbés (Clemens et Ma, 2016).

Une fois dans la plante les ET circulent dans la sève brute par la transpiration et dans la sève élaborée avec les photoassimilats. Un certain nombre de transporteurs de métaux régissent l'homéostasie des ET dans les différents tissus de la plante en fonction des besoins physiologiques pour les oligo-éléments. A nouveau, le manque de spécificité des transporteurs contribue à distribuer les contaminants dans toute la plante mais des mécanismes de régulation assurent de les tenir en grande partie à l'écart des compartiments sensibles notamment par séquestration dans les vacuoles. Les racines sont un organe important de séquestration expliquant que les teneurs des contaminants et de certains oligoéléments suivent généralement une hiérarchie racines>feuilles+tiges>fruit, graines (Clemens, 2019).

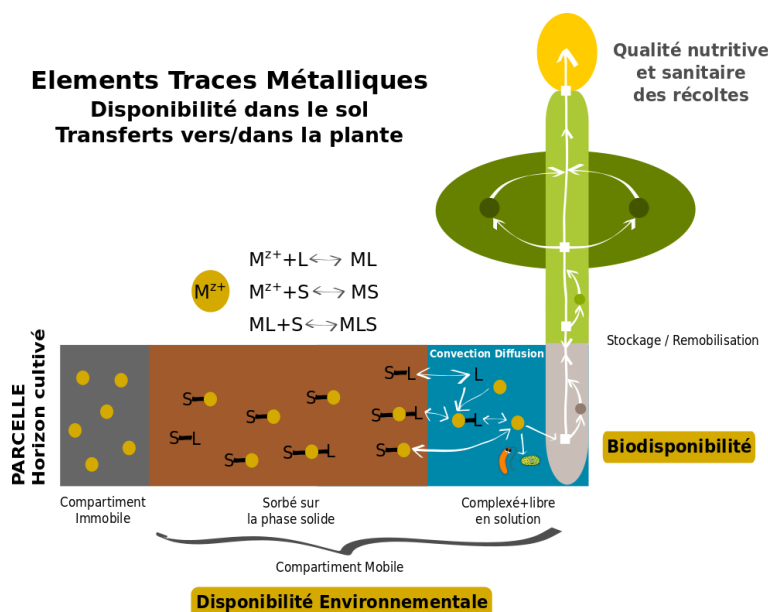


Figure 3 : Représentation schématique du transfert sol-plante des ET. Les ET (M) sont sorbés sur une phase solide (S) et en partie liés à des ligands (L) dans la solution de sol. Il est supposé que les racines absorbent principalement l'ion libre M^{2+} .

Les contaminants se retrouvent donc dans les organes consommés et l'enjeu agronomique est de réduire ces teneurs sans pénaliser la nutrition de la culture pour les oligo-éléments. Pour cela, on peut agir sur la disponibilité des ET dans le sol et sur le végétal. L'action sur le sol est limitée car les ET ne se dégradent pas (ce sont des éléments chimiques et non des molécules), et il est difficile d'appauvrir rapidement un sol en ET pour le décontaminer. Il faut donc intervenir sur la disponibilité en surveillant

la qualité des intrants et en surveillant la variable la plus importante, le pH, qui doit être neutre à légèrement alcalin et surtout pas en dessous de 6.5. On le corrigera donc et on évitera les engrais acidifiants, comme les engrais ammoniacaux. On peut aussi apporter de la matière organique qui complexent les ET mais son effet dépend de sa nature et est plus difficile à prévoir (McLaughlin et al., 1999).

Les leviers d'actions sur le sol sont donc limités et le levier le plus facile est d'intervenir sur le végétal en évitant de cultiver sur un sol à risque, des espèces végétales et des variétés qui ont un fort potentiel d'accumulation des ET contaminants. Pour une disponibilité du sol en ET donnée, l'accumulation dans la plante dépend de l'espèce et du cultivar (variété). Par exemple, au niveau de l'espèce, Broadley et al. (2001) a établi le classement suivant pour la teneur moyenne en Cd des parties aériennes (feuilles + tiges) : avoine = pois < soja < blé tendre = carotte < tomate = maïs < radis < colza < épinards < tabac < blé dur. Au sein des céréales, le blé dur est l'espèce la plus accumulatrice de Cd. Au sein du blé dur, les différences d'accumulation du Cd sont par exemple d'un facteur 2 à 3.

IV. Contamination des cultures alimentaires par les ET : l'exemple du cadmium et du blé dur

Le cadmium (Cd) est un élément présent généralement à l'état de trace dans l'environnement. Non essentiel à la vie, il est extrêmement toxique et est classé cancérigène. Le Cd est faiblement éliminé par le corps et il s'accumule dans les reins, le foie. Pour l'Homme, une exposition chronique à de faibles doses peut conduire à des pathologies rénales et osseuses. Récemment, une étude nationale conduite par Santé Publique France a montré que la population Française présentait un taux d'imprégnation au cadmium en augmentation et souvent supérieure aux valeurs de référence pour le risque toxicologique (Oleko et al., 2021). Chez l'Homme, après le tabagisme, la principale voie d'exposition est l'alimentation (Alexander et al., 2009).

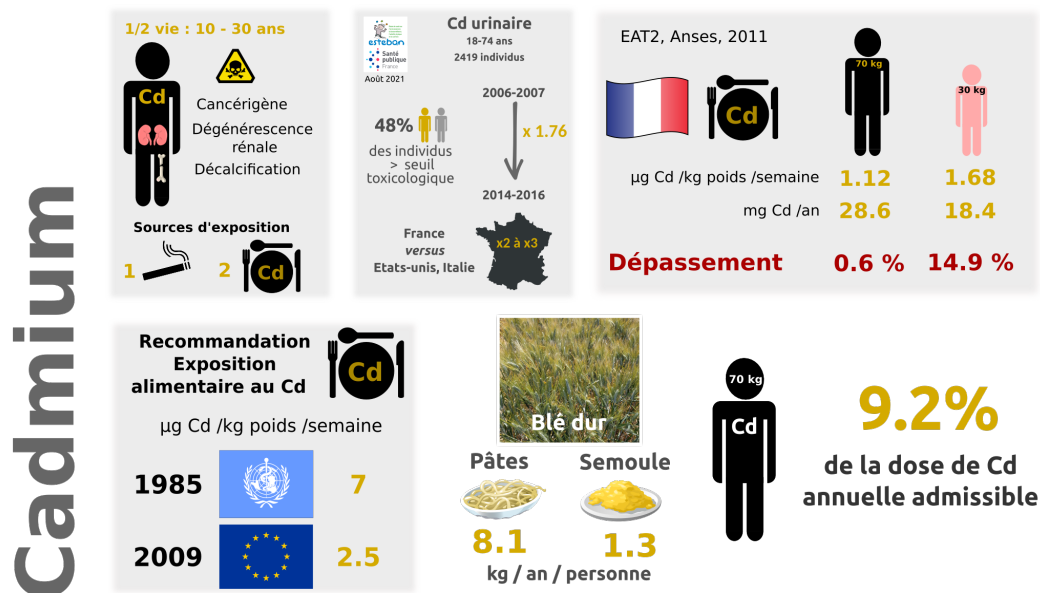


Figure 4 : Infographie illustrant la problématique de la contamination du blé dur par le Cd. Voir le texte pour les détails

De précédentes études européennes avaient également alerté sur la nécessité de réduire l'exposition des populations aux Cd. En 2009 : l'agence européenne de sécurité alimentaire (EFSA) recommande d'abaisser la dose hebdomadaire tolérable (DHT) d'exposition au Cd par voie alimentaire de 7 à 2.5 µg Cd/kg de poids corporel (Efsa, 2011). La dernière étude de l'alimentation totale en France conduite par l'Anses (EAT2) souligne que parmi les principaux contributeurs à l'exposition alimentaire

au Cd figure les produits céréaliers et c'est encore plus vrai pour l'alimentation des nourrissons (Anses, 2011). Comme toutes les plantes, le blé dur absorbe le Cd du sol par ses racines, contaminant ainsi les grains qui servent à confectionner les quelques 9 kg de pâtes et semoules que nous consommons en moyenne annuellement (Figure 4).

Dans ce contexte, le règlement européen EC1881/2006 fixant la teneur maximale de certains aliments en contaminants minéraux dont le Cd a fait l'objet de plusieurs projets de révision vers des seuils plus bas, notamment pour le blé dur qui accumule plus fortement le Cd que le blé tendre. Le seuil en vigueur de 0.2 mg Cd/kg blé dur aurait dû être ainsi abaissé à 0.1 mg/kg. Les travaux que nous avons conduits avec Arvalis-Institut du Végétal montrent que plus de 20% des parcelles en blé dur n'auraient pas été conformes. Face à cette menace pour la filière, de nouvelles discussions ont abouti à des propositions de seuils de 0.15 (8 % de taux de rejets) puis 0.175 mg/kg (5.4 % de rejets). En 2014, le projet de révision du seuil pour le blé dur avait été abandonné au profit de recommandations pour diminuer la contamination. Mais en août 2021, le seuil est finalement abaissé de 0.2 à 0.18 mg/kg (EC1323/2021). Il est alors estimé qu'en moyenne, environ 5 % des parcelles de blé dur françaises seraient non-conformes, avec des taux plus élevés qui pourraient atteindre 15-20 % dans certains départements où la biodisponibilité du Cd dans les sols est plus importante (Figure 5).

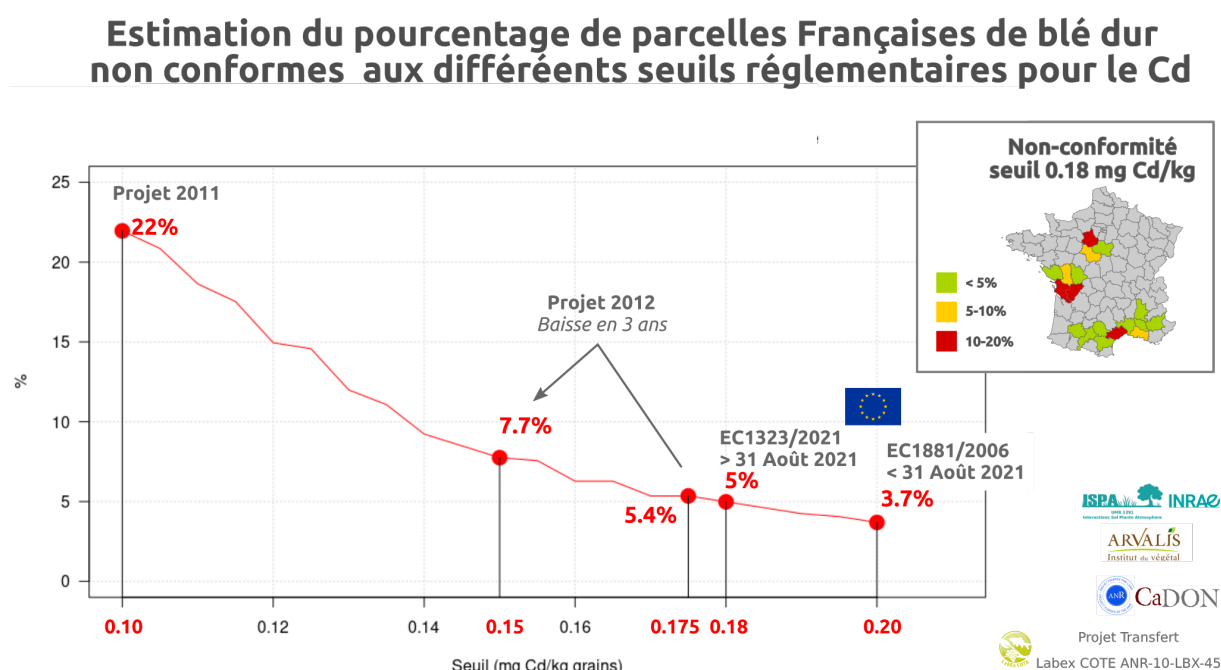


Figure 5 : Estimation de la non-conformité des parcelles de blé dur en France selon les réglementations européennes passée, actuelle et envisagées.

Au Canada, premier producteur mondial de blé dur, lorsque les discussions sur les réglementations de teneur en Cd du blé ont été engagées dans les années 90, un programme de sélection variétale a été conduit pour produire des variétés peu accumulatrices. Il a été ainsi identifié un gène *Cdu1* qui favorise la séquestration du Cd dans les racines et qui réduit d'un facteur de 2 à 3 l'allocation du Cd aux parties aériennes et donc aux grains (Grant et al., 2008 ; Maccaferri et al., 2019).

Il est attendu que la réglementation sur le Cd dans les produits alimentaires continue à se durcir. Au champ, l'agriculteur est démuné pour limiter la contamination cadmiée de ses récoltes. Le besoin s'est fait sentir de disposer i) d'une source d'informations synthétiques sur les contaminants métalliques et sur les mécanismes de contamination des cultures, ii) d'outils pour diagnostiquer le risque de non-conformité d'une récolte, iii) de solutions à mettre en œuvre.

V. Blessûr : un outil opérationnel et une preuve de concept pour la prédiction de la conformité du blé dur aux seuils réglementaires pour la teneur en contaminants métalliques

Face à la tension sur le Cd pour la filière blé dur, l'UMR Ispa Inrae (équipe Biogéochimie des Eléments Traces) et Arvalis-Institut du végétal ont développé l'outil « Bléssûr » qui permet de prédire le risque non-conformité d'une future récolte de blé dur vis-à-vis du Cd afin de permettre aux producteurs d'anticiper les mesures préventives nécessaires.

Grâce aux projets Cadur (Arvalis-Inra CR 127518) et Cadon (ANR 15-CE21-0001-04), nous avons constitué une collection nationale de plus de 560 échantillons appariés de terre et de grains de blé dur prélevés chez des agriculteurs pendant 3 ans (-2016-2018) et couvrant l'ensemble des bassins de production du blé dur en France. L'analyse des ET des sols et des grains ainsi que les caractéristiques agronomiques de l'analyse de terre ont été déterminées pour paramétrer un ensemble de modèles qui sont agrégés pour prédire le risque de non-conformité d'une future récolte par rapport au seuil réglementaire sur le Cd (Nguyen et al., 2021) : l'outil Bléssûr (Figure 6, 7). L'utilisateur doit fournir i) les données de l'analyse de terre qui déterminent la disponibilité du Cd du sol (teneur en Cd, pH, texture, teneur en matière organique et en azote total) et ii) la variété qui conditionne l'aptitude de la plante à accumuler le Cd dans ses grains. La teneur en Cd du sol n'étant pas une mesure habituelle, l'utilisateur peut obtenir une estimation pour sa parcelle en identifiant sa position sur une carte géographique interactive. L'estimation est calculée par modélisation géostatistique à partir des données nationales de mesure de la qualité du sol (RMQS) (Marchand et al., 2010, Saby et al., 2011).



Figure 6 : Capture d'écran de la page d'accueil de l'outil Bléssûr (<https://ispa.bordeaux.inra.fr/services/blesur/>)

La prédiction du risque de non-conformité de la récolte à partir de l'analyse de terre et de la variété est fondée sur des algorithmes d'apprentissage automatique qui, une fois agrégés sont particulièrement performants. Bléssûr détecte 82 % des cas réels de non-conformité et les prédictions de non-conformité sont fiables à 75 %. Pour les cas de conformité, les performances sont respectivement de 88 % des cas détectés avec 89 % de fiabilité. Ces performances illustrent également que dans les sols agricoles faiblement contaminés, la biodisponibilité des ET est régie par la teneur du sol en ET, par le pH, la matière organique et par les argiles+limons. La modélisation conduite dans Bléssûr a également permis de proposer un classement des principales variétés de blé dur cultivées en France quant à leur aptitude à accumuler le Cd dans les grains. L'agriculteur peut ainsi limiter le risque de contamination en Cd de sa récolte en adaptant le couple parcelle-variété.

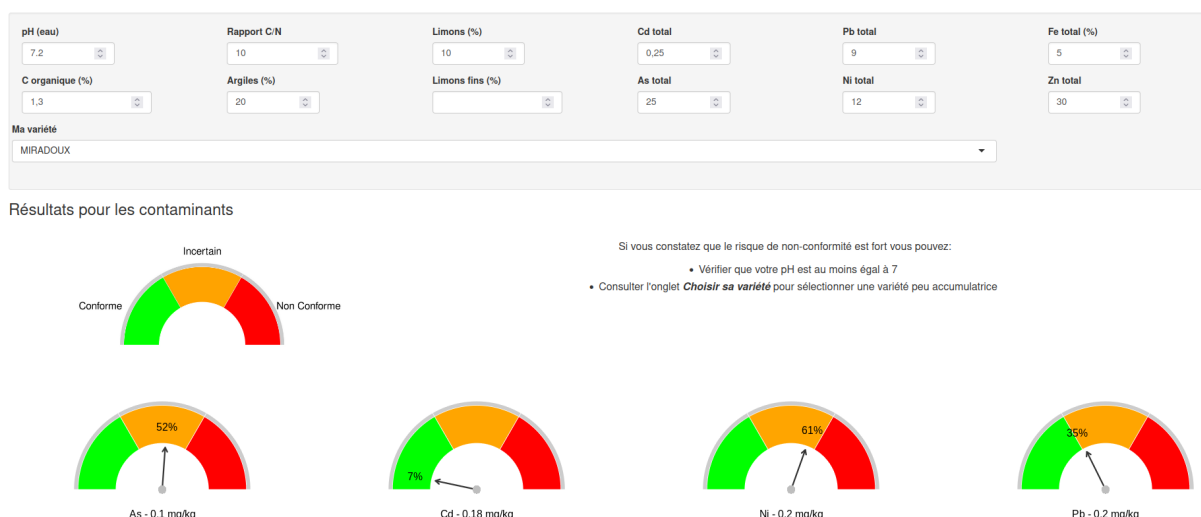


Figure 7 : Capture d'écran de la page de Bléssûr pour les prédictions du risque de non-conformité d'une future récolte de Blé dur à partir de données de l'analyse de terre et du nom de la variété.

Bléssûr a été étendu au Plomb (Pb) pour lequel le seuil est 0.2 mg/kg (EC2021/1317) et pour deux éléments qui pourraient être également réglementés : l'Arsenic (seuil anticipé à 0.1 mg/kg) et le Nickel (seuil anticipé à 0.2 mg/kg). Bléssûr fournit également une estimation de la teneur en Fer (Fe) et Zinc (Zn) pour évaluer la qualité nutritionnelle des grains. Bléssûr comporte également une page d'informations sur les ET, contaminants et oligo-éléments et leurs enjeux en agriculture.

Un projet « Transfert et Valorisation » financé par le Labex COTE (Université de Bordeaux, ANR-10-LABX-45) a permis de mettre l'outil Bléssûr à la disposition de la profession grâce à une interface internet pour que l'utilisateur fasse lui-même ses simulations et consulte les sols et variétés à risques. Bléssûr aide la filière à gérer le durcissement de la réglementation tout en améliorant la qualité sanitaire du blé dur.

Les relations entre la santé humaine et la qualité de l'environnement sont au cœur des préoccupations des citoyens mais aussi des pouvoirs publics (cf Plan National Santé et Environnement, PNSE1, 2, 3 et 4). Dans ce contexte, la réglementation sur les contaminants métalliques des produits alimentaires se durcit. Pour le Cd, depuis août 2021 (EC1323/2021), ce sont 44 valeurs réglementaires qui ont été fixées pour différentes catégories de produits végétaux contre seulement 10 dans le règlement précédent. Pour aider les filières, la démarche développée dans Bléssûr pourrait être appliquée à d'autres productions végétales de grandes cultures ou de maraîchage. Il faudrait pour cela constituer une base de données associant l'analyse de terre et la teneur du produit végétale en contaminants pour reparamétrer les modèles. Plus la base de données est importante, meilleurs seront les modèles et selon notre expérience, il faudrait au moins 500 observations appariées analyses de terre + teneurs du produit végétal. Cette démarche permettrait également pour une production végétale donnée, de caractériser le pouvoir d'accumulation des contaminants métalliques des variétés cultivées et donc de faciliter la sélection de futurs cultivars peu accumulateurs.

Références bibliographiques

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 2011. Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) (Avis de l'Anses Rapport d'expertise).

Broadley, M.R., Willey, N.J., Wilkins, J.C., Baker, A.J.M., Mead, A., White, P.J., 2001. Phylogenetic variation in heavy metal accumulation in angiosperms. *New Phytologist* 152, 9–27. doi:[10.1046/j.0028-646x.2001.00238.x](https://doi.org/10.1046/j.0028-646x.2001.00238.x)

Clemens, S., 2019. Safer food through plant science: reducing toxic element accumulation in crops. *Journal of Experimental Botany* 70, 5537–5557. doi:[10.1093/jxb/erz366](https://doi.org/10.1093/jxb/erz366)

Clemens, S., Ma, J.F., 2016. Toxic Heavy Metal and Metalloid Accumulation in Crop Plants and Foods. *Annual Review of Plant Biology* 67, 489–512. doi:[10.1146/annurev-arplant-043015-112301](https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043015-112301)

EFSA, 2011. Scientific Opinion : Statement on tolerable weekly intake for cadmium. *EFSA Journal* 9.

Grant, C.A., Clarke, J.M., Duguid, S., Chaney, R.L., 2008. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of The Total Environment* 390, 301–310. doi:[10.1016/j.scitotenv.2007.10.038](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.038)

Maccaferri, M., Harris, N.S., Twardziok, S.O., Pasam, R.K., Gundlach, H., Spannagl, M., Ormanbekova, D., Lux, T., Prade, V.M., Milner, S.G., Himmelbach, A., Mascher, M., Bagnaresi, P., Faccioli, P., Cozzi, P., Lauria, M., Lazzari, B., Stella, A., Manconi, A., Gnocchi, M., Moscatelli, M., Avni, R., Deek, J., Biyiklioglu, S., Frascaroli, E., Corneti, S., Salvi, S., Sonnante, G., Desiderio, F., Marè, C., Crosatti, C., Mica, E., Özkan, H., Kilian, B., Vita, P.D., Marone, D., Joukhadar, R., Mazzucotelli, E., Nigro, D., Gadaleta, A., Chao, S., Faris, J.D., Melo, A.T.O., Pumphrey, M., Pecchioni, N., Milanesi, L., Wiebe, K., Ens, J., MacLachlan, R.P., Clarke, J.M., Sharpe, A.G., Koh, C.S., Liang, K.Y.H., Taylor, G.J., Knox, R., Budak, H., Mastrangelo, A.M., Xu, S.S., Stein, N., Hale, I., Distelfeld, A., Hayden, M.J., Tuberosa, R., Walkowiak, S., Mayer, K.F.X., Ceriotti, A., Pozniak, C.J., Cattivelli, L., 2019. Durum wheat genome highlights past domestication signatures and future improvement targets. *Nature Genetics* 51, 885–895. doi:[10.1038/s41588-019-0381-3](https://doi.org/10.1038/s41588-019-0381-3)

Macnicol, R.D., Beckett, P.H.T., 1985. Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. *Plant and Soil* 85, 107–129. doi:[10.1007/BF02197805](https://doi.org/10.1007/BF02197805)

Marchant, B.P., Saby, N.P.A., Lark, R.M., Bellamy, P.H., Jolivet, C.C., Arrouays, D., 2010. Robust analysis of soil properties at the national scale: cadmium content of French soils. *European Journal of Soil Science* 61, 144–152. doi:[10.1111/j.1365-2389.2009.01212.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01212.x)

McLaughlin, M.J., Parker, D.R., Clarke, J.M., 1999. Metals and micronutrients – food safety issues. *Field Crops Research* 60, 143–163. doi:[10.1016/S0378-4290\(98\)00137-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00137-3)

Nguyen, C., Roucou, A., Grignon, G., Cornu, J.-Y., Méléard, B., 2021. Efficient models for predicting durum wheat grain Cd conformity using soil variables and cultivars. *Journal of Hazardous Materials* 401. doi:[10.1016/j.jhazmat.2020.123131](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123131)

Oleko A, Fillol C, Saoudi A, Zeghnoun A, Bidondo ML, Gane J, Balicco A. 2021. Imprégnation de la population française par le cadmium. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. Saint-Maurice : Santé publique France, 2021. 43 p. Disponible à partir de l'URL : <https://www.santepubliquefrance.fr>

Rascio, N., Navari-Izzo, F., 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science* 180, 169–181. doi:[10.1016/j.plantsci.2010.08.016](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016)

Saby, N.P.A., Thioulouse, J., Jolivet, C.C., Ratié, C., Boulonne, L., Bispo, A., Arrouays, D., 2009. Multivariate analysis of the spatial patterns of 8 trace elements using the French soil monitoring network data. *Science of The Total Environment* 407, 5644–5652. doi:[10.1016/j.scitotenv.2009.07.002](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.07.002)

Sogreah, 2007. Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine. Bilan qualitatif de la contamination par les éléments tracés métalliques et les composés tracés organiques et application quantitative pour les éléments tracés métalliques (Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par SOGREAH No. Rapport final). Ademe.