

Projet Gospel : Gestion optimale des schlamms phosphatés  
des exploitations minières

Utilisation agronomique des schlamms phosphatés de Taïba  
(Sénégal)

**Henri Calba**  
**Claire Chevassus**  
**Denis Montange**

Cirad Département Persyst

Septembre 2008

## Introduction

Cette étude représente une partie du projet GOSPEL «Gestion Optimale des Schlamms Phosphatés des Exploitations minières». Le projet est labellisé par le réseau RITEAU et est aidé par le Ministère de la Recherche. Il associe trois partenaires: TEC-ingénierie qui est le coordonnateur, le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) et le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM).

Le site minier de Taïba (Sénégal) est exploité par les Industries Chimiques du Sénégal (ICS). Le traitement des minerais de phosphate sédimentaires (i.e. celui de Taïba) génère d'importantes quantités de schlamms, particules fines (inférieures à 40 microns environ) qui sont écartées au cours des opérations d'enrichissement du minerai pour produire du concentré de phosphate marchand utilisable par l'industrie chimique.

Dans le cas des ICS, les schlamms représentent une part très importante du minerai brut, entre 35 et 38% en poids soit 2 à 2,3 millions de tonnes par an. Ils entraînent avec eux une grande partie de l'eau de procédé de traitement (de l'ordre de 15 Mm<sup>3</sup>/an). Ils sont stockés sous forme de boues dans les anciennes carrières d'exploitation aménagées en bassins de 50 à 200 hectares. Par décantation, consolidation et infiltration, les boues libèrent une partie de leur eau qui est récupérée par débordement (système de spillway) et par pompage des eaux d'exhaure des bassins drainants adjacents. La part d'eau récupérée est estimée à 30%. Elle est recyclée comme eau de process vers l'usine de traitement.

Les schlamms de phosphate représentent donc une importante réserve de sols (quand ils sont consolidés) et d'eau dans une région aride sub-saharienne. Le projet GOSPEL envisage de développer une activité agricole locale (de type maraîchage) en liaison avec l'activité minière, en exploitant au mieux les qualités du déchet minier : réserves hydriques et propriétés agronomiques. Compte tenu des besoins en eau de l'usine de traitement, le projet doit permettre:

- un recyclage optimal (au sens de compromis) des eaux de process pour minimiser les prélèvements dans le milieu naturel,
- un stockage de ces rejets miniers fins,
- un développement d'activités agricoles dans une zone défavorisée en ressources en sols fertiles et en eau.

## Cadre de l'étude

### **La mine de phosphates de Taïba, son exploitation**

Le permis de concession d'exploitation des phosphates de Taïba couvre une zone de 10485 ha dans un triangle de 25 km x 10 km entre M'Boro et Pir Goureye. La mine de Taïba comprend 3 sites d'extraction : Keur Mor Fall et Ndomor Diop (exploitation achevée pour ces deux zones) et Tobène (en démarrage).

La couche de minerai phosphaté (7 à 15 mètres de puissance), qui se trouve à une profondeur de 40 à 45 mètres environ, est exploitée à ciel ouvert. Il est à noter que la couche de minerais phosphatés est entièrement dans l'eau (la nappe phréatique en milieu naturel hors zone d'exploitation est à environ 25 - 30 mètres de profondeur dans les sables). Avant 1971, l'exploitation se faisait sans dénoyage de la couche de phosphates avec une dragline et un ponton flottant. Le stérile était donc mélangé dans la fosse. Cela a eu lieu pour les bassins 1 à 8. Le mode d'exploitation actuel nécessite le dénoyage de la couche de phosphates : il faut rabattre la nappe par pompage avant exploitation des phosphates par les draglines. Après décapage de la couche de sables dunaires (15 à 25 m) par des roues pelles (mise en remblai en

dehors du périmètre exploité), les grès et autres couches plus ou moins indurées stériles sont enlevées par pelleteuses et bulldozers (et explosifs si nécessaires) puis les draglines ôtent les stériles (argiles bariolées) surplombant les phosphates. Cette dernière couche de stériles est entreposée par les draglines derrière le front de taille et forme le fond des bassins, au dessus de la couche de marne imperméable.

Lors de l'exploitation, des bassins sont créés, séparés en entités plus ou moins grandes par des digues. 18 bassins ont été ainsi creusés, les 10 derniers ayant au fond une couche de marnes imperméables et des dépôts de matériaux stériles plus ou moins phosphatés. Creusement des Bassins 1 à 8 : jusqu'en 1971 ; 9 à 12 (fin de Ndomor Diop) : 1971 à 1980 ; 13 à 17 : 1981 à 1991 ; 18 : 1992 à 2003. A partir de 2004, année de démarrage de l'exploitation des minerais de la zone de Tobène, les couches de sables dunaires ne seront plus stockés en dehors de l'exploitation, mais remis sur les couches de stériles dans la fosse afin de revenir au niveau du sol « naturel ». Il n'y aura ainsi plus de « bassins » disponibles pour recevoir les schlamms de la laverie et cela pourrait poser à terme un problème de gestion de ces sous-produits de l'exploitation minière.

### **Cycle de l'eau sur la mine de Taiba Tobène**

Au début de l'exploitation, l'approvisionnement en eau pour la mine et la transformation chimique des minerais phosphatés a nécessité le creusement de forages profonds (nappe à 500 m) et superficiels (nappe phréatique à environ 50 m). Le paiement d'une redevance au volume d'eau prélevé représente un coût important pour les ICS. 10 m<sup>3</sup> d'eau sont nécessaires pour la production d'une tonne de minerai phosphaté marchand, soit environ 2500 m<sup>3</sup> par heure. Depuis quelques années, l'eau utilisée par la laverie et la flottation provient essentiellement du recyclage des eaux des schlamms + des exhaures en front de mine : l'eau de la nappe phréatique doit être pompée (pour dénoyer la veine de phosphates) avant d'excaver les phosphates. Au niveau du front de coupe abandonné (mine de Taiba, panneau Keur Mor Fall IV), il y a toujours une arrivée d'eau de la nappe. Il y a donc moins besoin d'utiliser les forages pour approvisionner en eau l'atelier de préparation des minerais.

Le recyclage de l'eau des schlamms se fait de manière peu onéreuse du fait de leur épandage/décantation/consolidation progressive dans des bassins créés lors de l'exploitation des phosphates et dont le fond est composé d'une couche de marnes imperméables sous le niveau des phosphates excavés. Il n'y a donc pas ou peu de pertes d'eau par infiltration. 15 millions de mètres cube de schlamms à 140 g de matière sèche par litre sont produits par an.

### **Création des bassins et mise en culture**

Les agriculteurs, déplacés ou non suite à l'avancée du front de taille, cultivent certains bassins créés par l'exploitation minière. Pour les bassins de stockage d'eau libre, c'est le pourtour qui est cultivé afin de profiter de l'eau pour l'irrigation.

Certains bassins sont cultivés peu après l'exploitation des phosphates, directement sur les stériles, avec des cultures irriguées grâce à la présence toute proche de la nappe. Mais ces cultures sont nécessairement temporaires du fait de l'apport dans le bassin dans un futur plus ou moins proche de schlamms provenant de la laverie de minerais. Il est à noter que des vergers de manguiers ont été parfois submergés par les schlamms, par exemple dans le bassin 15 qui est resté libre sans recevoir de schlamms depuis 1985 jusqu'en 2001.

On ne connaît pas encore exactement le temps nécessaire pour la consolidation des schlamms. Dans le bassin 15, qui est en cours de remplissage, des plantes aquatiques (joncs, roseaux ?) poussent déjà sur des zones à une certaine distance des berges, ce qui indiquerait qu'un début de consolidation a lieu dans ces endroits, tout en laissant les schlamms s'écouler de part et d'autre de ces « îlots ». Après décantation et consolidation des schlamms, le niveau baisse et le bassin recevra à nouveau un apport de schlamms. L'intervalle entre 2

rechargements en schlamms est aléatoire, différent selon le tassement et donc la diminution de hauteur du « sol ».

Certains bassins enschlamés depuis longtemps portent des vergers de manguiers (bassin 1) ou des cultures de maraîchages, manioc, etc. (bassin 2). Comme ces deux bassins sont longés par une conduite de schlamms, ils peuvent recevoir des schlamms de temps en temps, schlamms qui sont répartis par des canaux en périphérie des parcelles et qui rehaussent progressivement la surface du bassin. D'autres bassins (i.e. 8) peuvent recevoir des apports d'eau claire à partir de piquages sur les conduites.

Certains bassins enschlamés ne sont pas cultivés en contre-saison (i.e. bassin 7) car il n'y a pas d'eau disponible pour les cultures en dehors de la période pluvieuse. L'étude agronomique + socioéconomique a permis de connaître les méthodes de culture sur ces bassins ne recevant pas d'apport d'eau autres que par la pluie.

## Études conduites par le Cirad

L'agriculture dans la zone de MBoro est soumise à une contrainte hydrique très importante, surtout depuis plusieurs années avec des pluviométries déficitaires.

La présence dans la région d'agriculteurs privés de leurs terrains de culture par l'exploitation minière et la présence de terrains cultivables (bonne qualité agronomique des sols, possibilité d'irrigation dans certaines zones) dans les bassins des ICS font qu'il est difficile d'envisager que les bassins soient laissés à l'abandon.

Depuis de nombreuses années, des agriculteurs cultivent ces terrains, produisant des fruits et des légumes pour le marché local ou l'exportation. Les études agronomiques et socio-économiques réalisées auprès des exploitants agricoles cultivant sur les bassins ont montré l'intérêt de cultiver ces schlamms (bonne rétention d'eau, teneur suffisante en phosphore pour l'alimentation des plantes, ...)

Cependant, les premières visites de terrain ont permis de modifier les études agronomiques prévues dans le projet. En effet, il n'y avait pas de problème agricole posé par la gestion des nappes d'eau dans les schlamms car ces nappes sont très profondes et les agriculteurs utilisent de l'eau de pluie ou de l'eau de conduite des ICS pour leurs besoins. Par contre, notre attention a été attirée par certaines pratiques d'irrigation avec des schlamms frais et de fertilisation azotée de cultures sur les schlamms. L'absorption des éléments nutritifs par le système racinaire s'accompagne de prélèvements plus ou moins importants d'autres éléments neutres, bénéfiques ou toxiques. L'emploi de certains engrais peut entraîner des modifications au niveau de l'acidification de la rhizosphère pouvant entraîner une dissolution de composés chimiques.

Les minerais de phosphate sédimentaires sont souvent riches en éléments traces métalliques, en particulier en cadmium, chrome, mais aussi en uranium, fluor... Les schlamms de Taïba ont des teneurs élevées en cadmium. C'est une raison suffisante pour que le phosphate de Taïba ne puisse pas être vendu en Europe.

Il est donc important de vérifier l'influence des pratiques culturales sur l'absorption du cadmium, du chrome et du fluor par les cultures et leur stockage dans les parties comestibles des plantes.

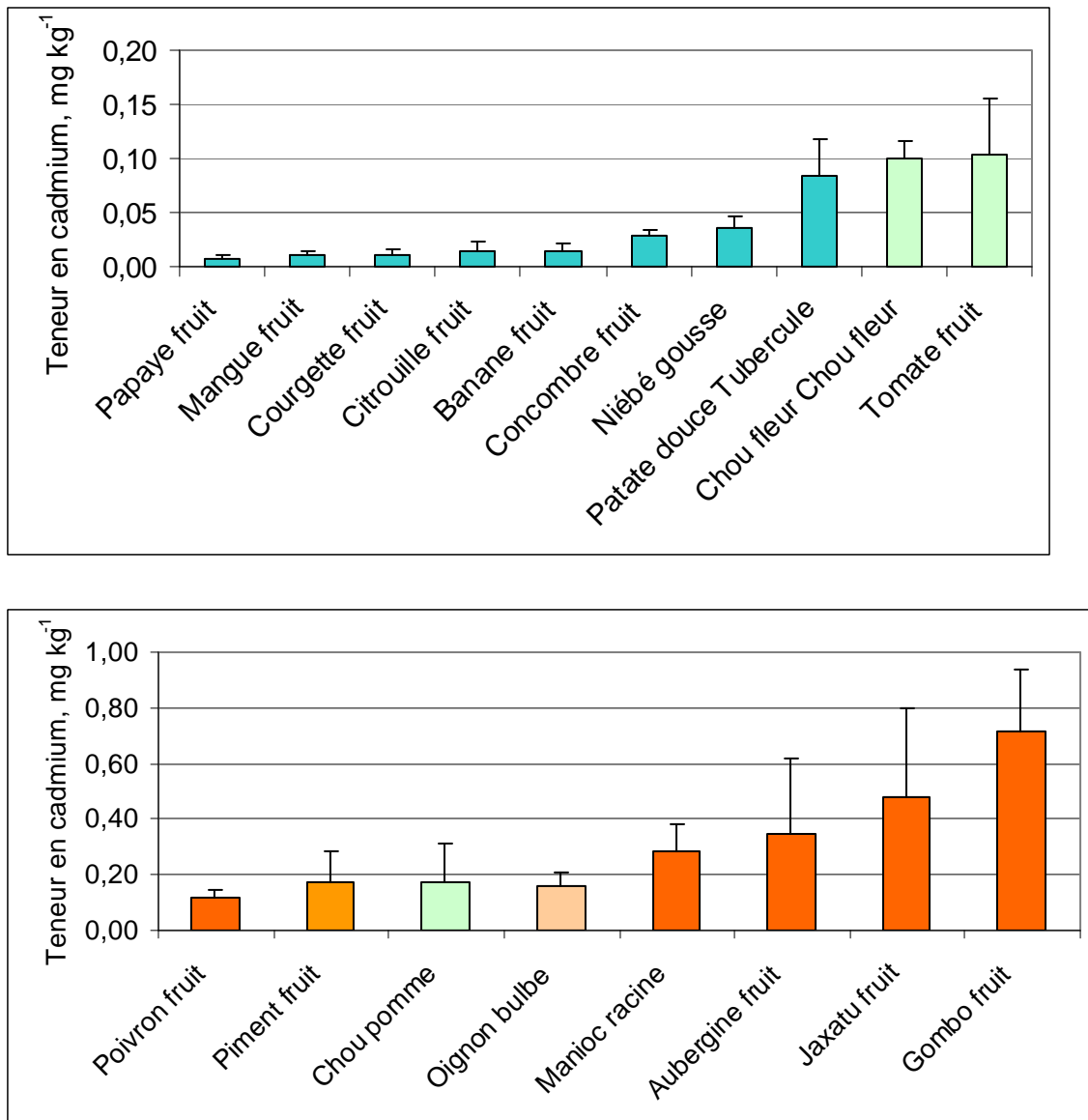
## Analyse des prélèvements d'organes sur les cultures

La synthèse des résultats de terrains concerne les prélèvements effectués sur les plantations dans les bassins. Les analyses de cadmium ont été réalisées sur l'ensemble des prélèvements. Les analyses de chrome ont été réalisées partiellement après analyse des

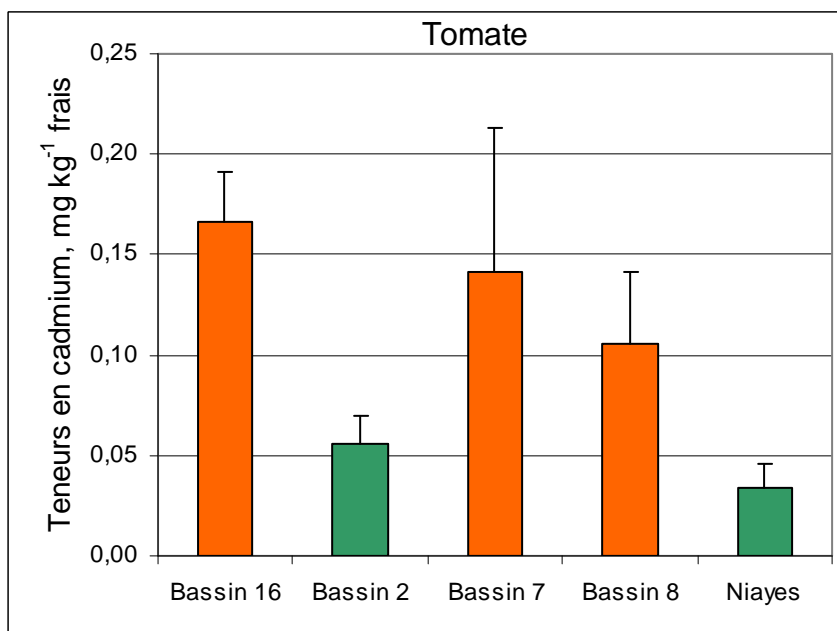
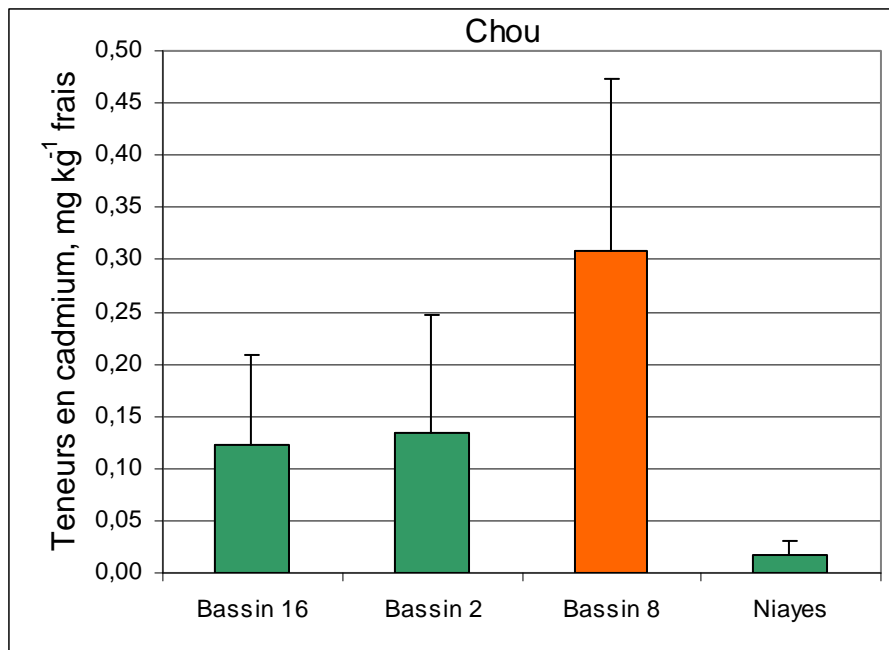
teneurs en cadmium des différents organes prélevés. Les analyses de fluor ont été effectuées principalement sur les parties comestibles des plantes.

## Analyse du cadmium

La figure 1 montre les teneurs en cadmium mesurées dans les organes de plantes prélevées dans les bassins 2, 16, 8 principalement. Des prélèvements dans les bassins 1 et 7 ont été réalisés pour compléter l'échantillonnage. Les couleurs utilisées du vert au rouge représentent le niveau de risque lié au respect de la norme UE pour le cadmium,  $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$  de fruit frais,  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  de tubercule et racine frais et  $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$  de légume feuille frais. Dans le cas du chou fleur, la norme UE n'est pas suffisamment précise. On observe que la tomate se situe au delà de la norme ( $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et que la pomme du chou se situe près de celle-ci ( $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ).



**Figure 1 :** Teneurs en cadmium, exprimées par rapport au poids frais, dans différents organes de plantes cultivées sur les bassins à schlamms.



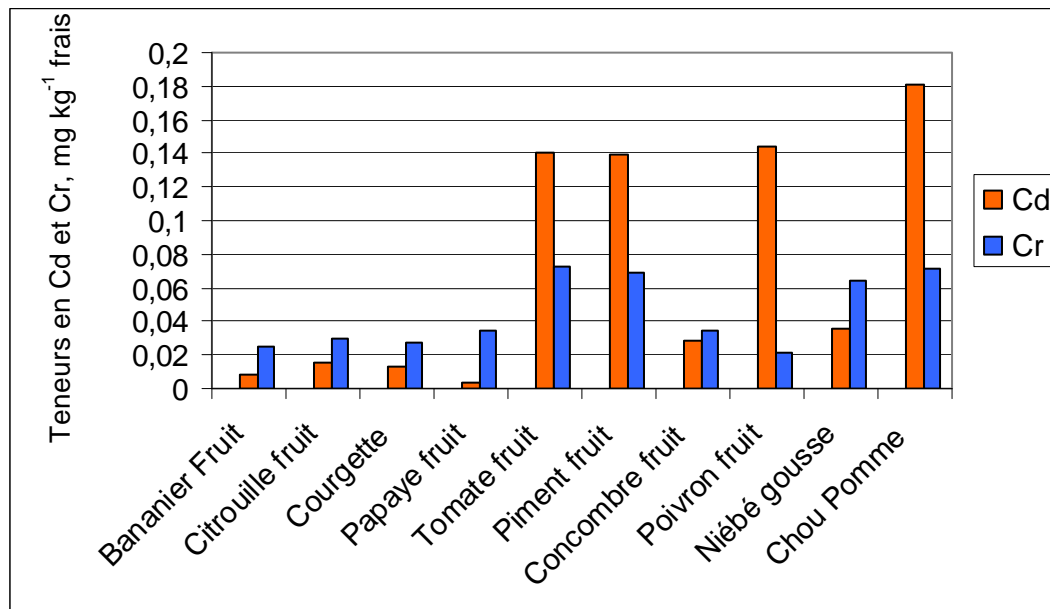
**Figure 2 :** Teneurs en cadmium dans la pomme de chou et dans la tomate en fonction de la localisation des prélèvements

La figure 2 montre les teneurs en cadmium dans les pommes de chou et dans les tomates prélevées dans les bassins et dans les Niayes. Les Niayes de Mboro sont suffisamment loin des ICS pour ne pas être impactés par les schlamms. Nous les considérerons donc comme nos témoins. Dans le cas du chou, on observe un dépassement de la norme UE dans le bassin 8. Dans le cas de la tomate, hormis le témoin prélevé dans les Niayes, seule la production du bassin 2 se situe au niveau de la norme UE. Les différences de teneurs en cadmium constatées sur d'autres productions permettent de conclure que le prélèvement de cadmium est plus faible dans le bassin 2 que dans les bassins 7 et 8.

Une analyse plus fine des schlamms a permis d'observer que la concentration totale en Cd des schlamms du bassin 2 est de  $48,3 \text{ mg.kg}^{-1}$  (de MS), celles du bassin 7 de  $59,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ , que la fraction phytodisponible de Cd est égale à  $0,05 \text{ mg.kg}^{-1}$  (de MS) pour le 2 et de  $0,11 \text{ mg.kg}^{-1}$  pour le 7. Les fractions phytodisponibles (extraction à  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $1\text{mol.l}^{-1}$ ) sont supérieures aux seuils d'investigation ( $0,04 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) du guide destiné aux dérogations pour l'épandage des boues de STEP. Les fractions phytodisponibles des schlamms des bassins 7 et 2 sont significativement différentes ( $P=0.001$ , test-t à 2 échantillons, Minitab 13.2). De plus, elles représentent 0,10 % et 0,19 % du Cd total respectivement pour les bassins 2 et 7.

Le bassin 16, constitué de stériles, présente des résultats très contrastés en fonction des cultures. De plus, l'hétérogénéité des matériaux d'apport ne permet pas de conclure sur l'utilisation potentielle de ce bassin dans le cas de plantes dont les teneurs en cadmium sont proches des limites UE.

### Analyse du chrome



**Figure 3** : Teneurs en chrome et en cadmium dans quelques plantes cultivées dans les bassins à schlamms

L'analyse de la figure 3 montre que les teneurs en chrome dans les parties comestibles de quelques plantes sont de l'ordre de grandeur de celles du cadmium. Les teneurs dans les fruits des espèces qui prélèvent peu de cadmium (i.e. arbres fruitiers, cucurbitacées), sont toujours inférieures à  $0.05 \text{ mg kg}^{-1}$ . Pour les autres plantes, les teneurs en chrome sont souvent inférieures à celles du cadmium.

### Analyse du fluor

L'analyse comparée des risques liés au fluor et au cadmium dans le tableau 1, montre que le risque majeur est lié au cadmium. En l'absence de norme UE sur les teneurs autorisées en fluor dans les végétaux, le risque a été évalué sur la base de la consommation maximum de  $0.1 \text{ mg}$  de F par kilogramme de poids de corps. Il s'agit d'une dose journalière au-delà de

laquelle un risque de fluorose osseuse peut apparaître. Sur cette base, 4 classes ont été définies d'une manière arbitraire. Elles correspondent à des poids de corps de 0-20 kg, 20-50 kg, 50-100 kg et au-delà de 100 kg. De la même façon, des couleurs correspondant au risque lié au cadmium ont été définies sur la base des normes UE. Les résultats obtenus sont dans l'ensemble cohérents, le risque lié au fluor n'est pas supérieur à celui lié au cadmium. Un cas particulier ressort toutefois pour une série d'analyses sur les citrouilles de la variété noire cultivées dans le bassin 1 pour lesquelles les analyses de fluor montrent des résultats élevés.

### Analyse comparée des risques liés aux teneurs en cadmium et fluor dans les parties comestibles de certaines plantes cultivées dans les bassins à schlamms

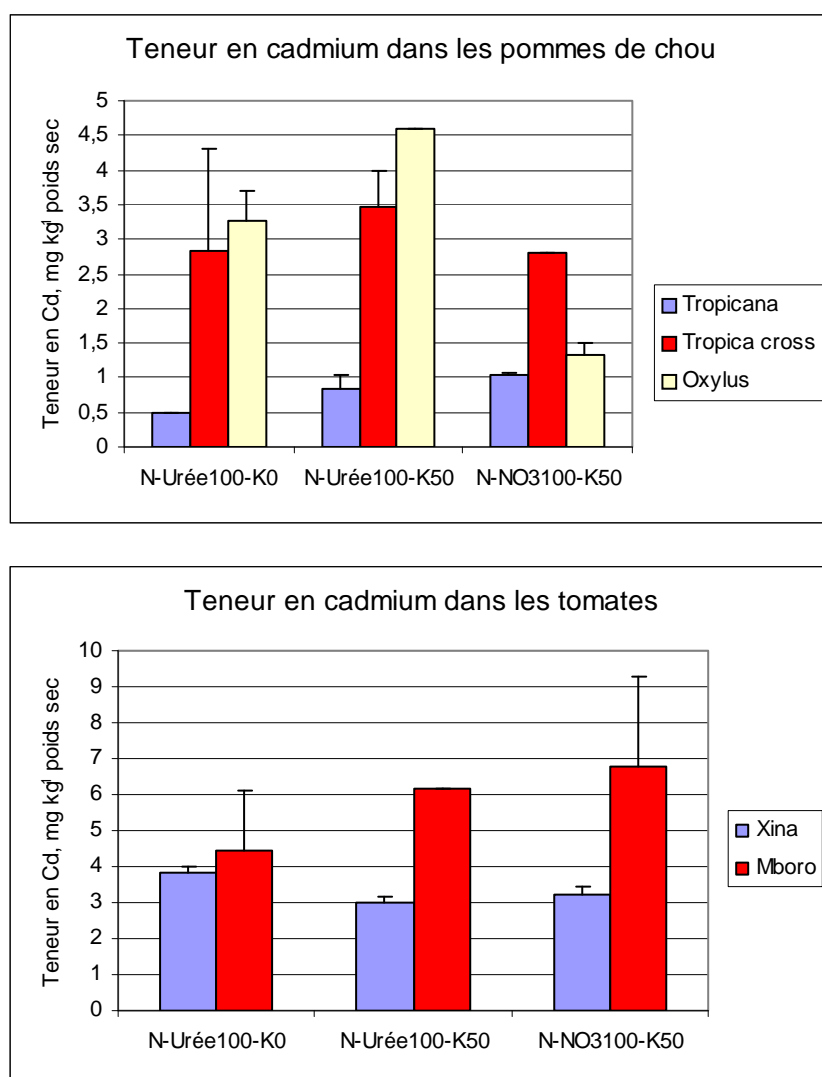
en vert : pas de problème ; en jaune : précautions à prendre selon les normes en vigueur en Europe (Cd pour l'UE) ou selon l'OMS (Fluor)

	Bassin 1		Bassin 2		Bassin 7		Bassin 8		Bassin 16		Niayes	
	Cd	F	Cd	F	Cd	F	Cd	F	Cd	F	Cd	F
<b>Courgette</b>	-	-	0.01	0.10	0.01	1.20	-	-	-	0.38	0.01	0.16
<b>Papaye</b>	-	-	0.01	0.59	-	-	-	-	0.01	1.22	0.00	-
<b>Mangue</b>	-	-	0.01	1.25	-	-	-	-	-	-	0.00	1.33
<b>Citrouille</b>	0.01	6.57	-	-	0.03	2.47	0.01	-	0.01	0.32	0.03	0.05
<b>Concombre</b>	-	-	0.02	0.35	-	-	0.03	3.40	-	-	0.01	0.08
<b>Niébé</b>	-	-	-	-	0.04	-	-	-	0.03	4.91	0.01	6.07
<b>Patate douce</b>	0.08	6.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Tomate</b>	-	-	0.06	1.87	0.14	2.04	0.11	0.48	0.17	0.31	0.03	0.49
<b>Chou pomme</b>	-	-	0.13	1.33	-	-	0.31	6.04	0.12	1.48	0.02	0.10
<b>Chou fleur</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10	3.12	-	-
<b>Poivron</b>	-	-	0.11	3.60	-	-	0.15	0.05	-	-	-	-
<b>Jaxatu</b>	-	-	0.24	0.83	-	-	0.31	0.71	0.69	1.41	0.01	0.37
<b>Manioc</b>	0.27	1.28	0.25	27.6	0.33	47.3	0.45	17.9	0.17	0.84	0.02	0.76
<b>Aubergine</b>	-	-	0.30	0.37	-	-	0.77	1.00	0.37	0.18	0.02	0.41
<b>Gombo</b>	-	-	0.52	0.66	0.96	4.10	0.67	5.12	-	-	0.02	-
<b>Chou première feuille</b>	-	-	0.70	35.5	-	-	1.17	18.5	0.37	5.41	0.03	3.96
<b>Teneurs en Cadmium</b>	UE (feuille, 0.2mg)				UE (tubercule, 0.1mg)				UE (fruit, 0.05mg)			
<b>Cadmium mg kg<sup>-1</sup> poids frais</b>	<0.2	-	>0.2	-	<0.1	-	>0.1	-	<0.05	-	>0.05	-
<b>Classes des teneurs en fluor</b>	Risque de fluorose = 0.1mg par kg de poids de corps et par jour											
<b>Fluor mg kg<sup>-1</sup> poids frais</b>	>10	-	5.0-10	-	2-5.0	-	0-2.0	-	-	-	-	-



## Essai en serre

Un essai en serre a été réalisé à Montpellier de mars à août 2006. L'objectif était de comparer différentes fumures minérales (urée, nitrate) avec 2 niveaux d'apport de K sur des choux et des tomates cultivées sur des schlamms ou un mélange schlamms/sable/MO. Les hypothèses testées étaient l'influence de la nutrition minérale et du pouvoir tampon du sol sur la dynamique de prélèvement des éléments, en premier lieu le cadmium. Malgré des conditions de culture très difficiles pour certaines variétés peu adaptées au climat méditerranéen, les prélèvements ont pu être en grande partie réalisés et analysés.



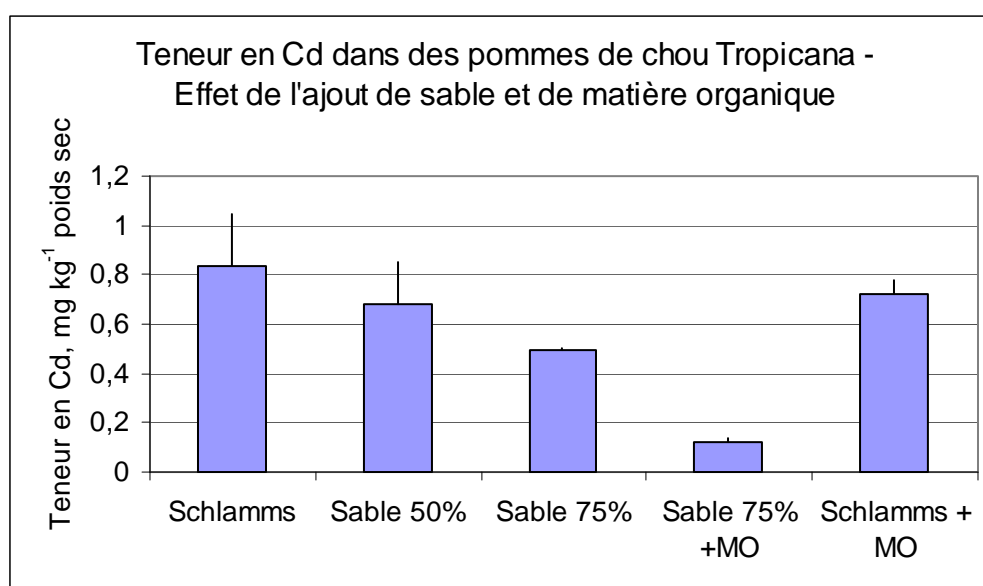
**Figure 4 :** Teneurs en cadmium dans les pommes de chou et dans les tomates cultivées en serre avec des fertilisations azotées et potassiques différentes.

La figure 4 montre les différentes teneurs en cadmium mesurées dans les pommes de chou (variétés Tropicana, Tropica cross et Oxylus), ainsi que dans les tomates Xina et Mboro cultivées en serre. Pour le chou, l'influence de l'apport de nitrate en remplacement de l'urée n'est visible que pour les variétés dont les teneurs en cadmium sont les plus élevées (Tropica cross et Oxylus). Quel que soit le traitement, la variété Tropicana prélève moins de cadmium que les autres variétés. Pour la tomate, l'influence de la forme d'azote ou de l'apport de K

n'est pas statistiquement visible. En présence de K, la variété Xina prélève moins de cadmium que la variété MBoro.

La figure 5 montre les teneurs mesurées sur les pommes de chou cultivés sur des schlamms mélangés / dilués avec du sable dans différentes proportions, avec ou sans apport de matière organique.

L'ajout de sable diminue le pouvoir tampon du sol et favorise donc le risque d'acidification rhizosphérique ainsi que la dissolution du cadmium. Par ailleurs, cet apport diminue la quantité disponible de cadmium provenant des schlamms. La figure 5 montre que la teneur en cadmium dans les feuilles décroît lorsque la proportion de sable augmente sans pour autant que la diminution soit proportionnelle au facteur de dilution du schlamm. L'apport de matière organique diminue également les teneurs mesurées de cadmium dans les pommes de chou. L'effet le plus important est obtenu avec l'ajout de MO avec une dilution du schlamm par du sable à 75%.

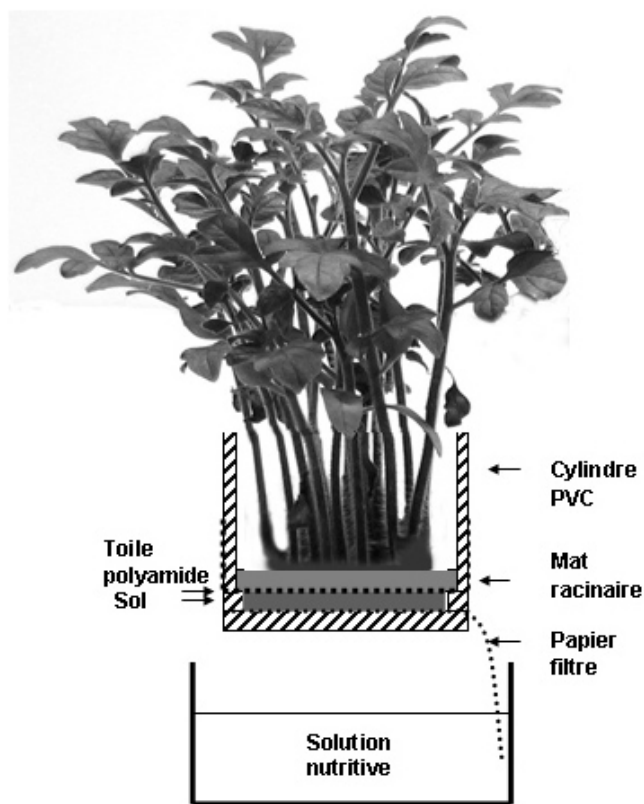


**Figure 5** : Teneurs en cadmium dans les pommes de chou, variété Tropicana, cultivés en serre sur du schlamm dilué avec du sable, avec ou sans matière organique.

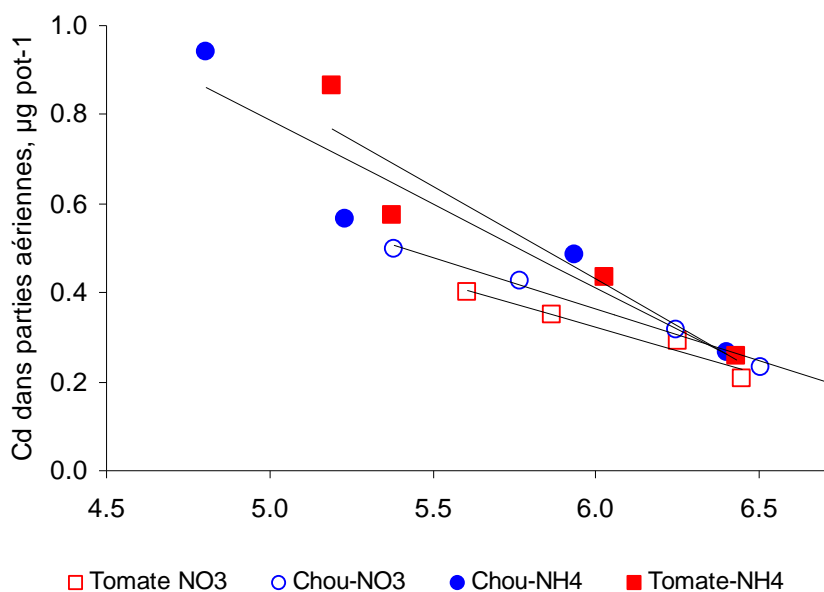
Les résultats montrent que le prélèvement de cadmium par le chou et la tomate dépend de facteurs liés à la capacité tampon du schlamm, à la capacité de la plante à prélever le cadmium et à le transférer dans les parties comestibles. Pour ce deuxième facteur, il apparaît que le choix des variétés cultivées peut constituer une voie de recherche pour la mise en valeur agronomique des bassins à schlamms. En ce qui concerne l'influence de la capacité tampon du substrat, il apparaît que les résultats obtenus sur les cultures en serre peuvent donner un élément d'interprétation des résultats obtenus dans le bassin 16 rempli de « stériles ». Le sol de culture dans ce bassin possède une CEC très faible (3.65meq%) et il est de texture sableuse (argile <10%). Sa teneur en cadmium (15 mg kg<sup>-1</sup>) est égale à 30% de celle des schlamms. On observe néanmoins des teneurs en cadmium dans les parties comestibles supérieures aux normes UE pour certaines plantes (Fig. 2). Les résultats obtenus dans les cultures en serre montrent que la diminution de la teneur en schlamm par dilution avec du sable diminue faiblement le prélèvement et que l'hypothèse de l'influence du pouvoir tampon sur la dynamique de prélèvement du cadmium paraît réaliste.

## Essai avec des dispositifs rhizosphériques

Pour conforter ce résultat, une étude a été réalisée en 2007 afin de vérifier, à l'aide d'un dispositif de culture spécifique (figure 6), l'influence du pouvoir tampon du sol (mélange du schlamm avec du sable) et de la matière organique ajoutée sur le pH rhizosphérique et sur la dynamique du cadmium entre le schlamm et la plante. Ce dispositif permet en effet d'obtenir un contact très étroit entre le sol étudié et les racines de plantes (mat racinaire), séparées du sol par une toile très fine ne laissant pas passer ces racines. Seules les excréments racinaires et la solution du sol peuvent traverser. La couche mince de sol peut donc être entièrement considérée comme du sol rhizosphérique.



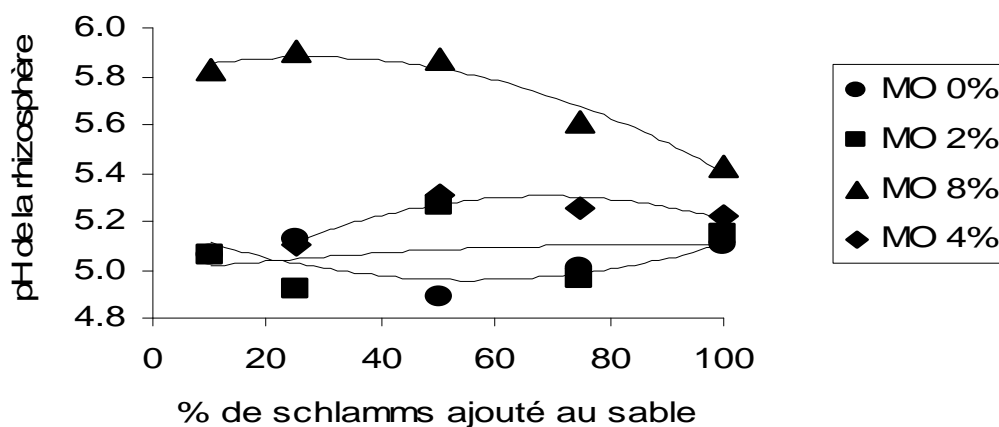
**Figure 6 :** Dispositif de culture en sol rhizosphérique



**Figure 7 :** Prélèvement de cadmium par le chou et la tomate en présence de  $\text{NO}_3$  ou de  $\text{NH}_4$  en fonction de l'évolution du pH de la solution.

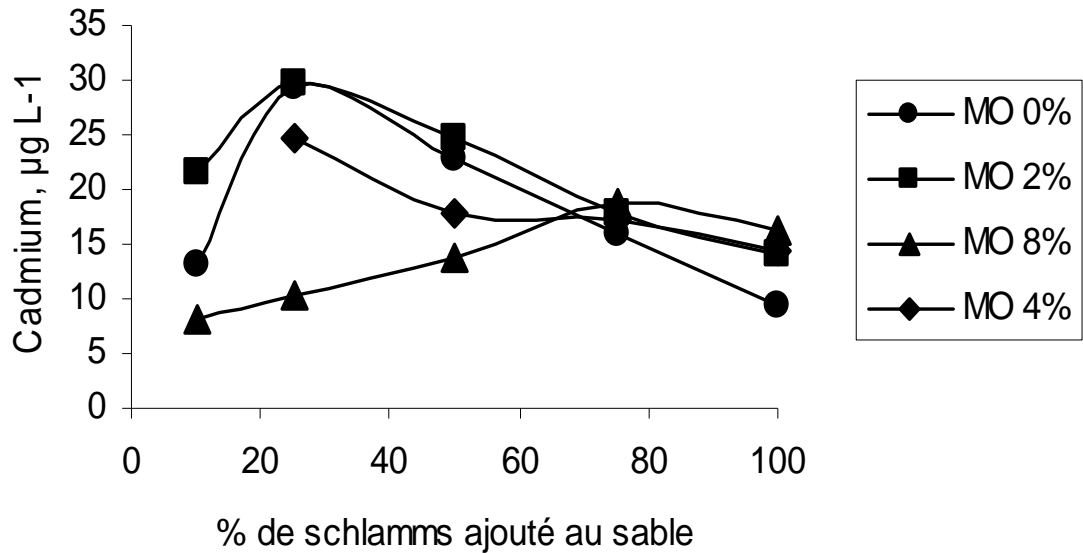
La figure 7 montre qu'en présence de nitrates (signes vides), la quantité de cadmium absorbé par les 2 espèces testées est moindre que dans le cas d'une alimentation azotée sous forme ammoniacale (signes pleins) car, dans ce cas-là, le pH de la rhizosphère s'acidifie (il passe de 6.5 à 4.7 en 14 jours environ), la quantité de cadmium phytodisponible augmente alors dans la rhizosphère et le cadmium est ainsi plus facilement absorbé par la culture. Il est à noter que l'engrais azoté le plus couramment utilisé par les agriculteurs dans la zone de Mboro est l'urée qui se transforme dans le sol en ammonium responsable donc d'une acidification dans la rhizosphère lors de son absorption.

pH dans la rhizosphère de chou cultivé sur des mélanges schlamms, sable, matière organique



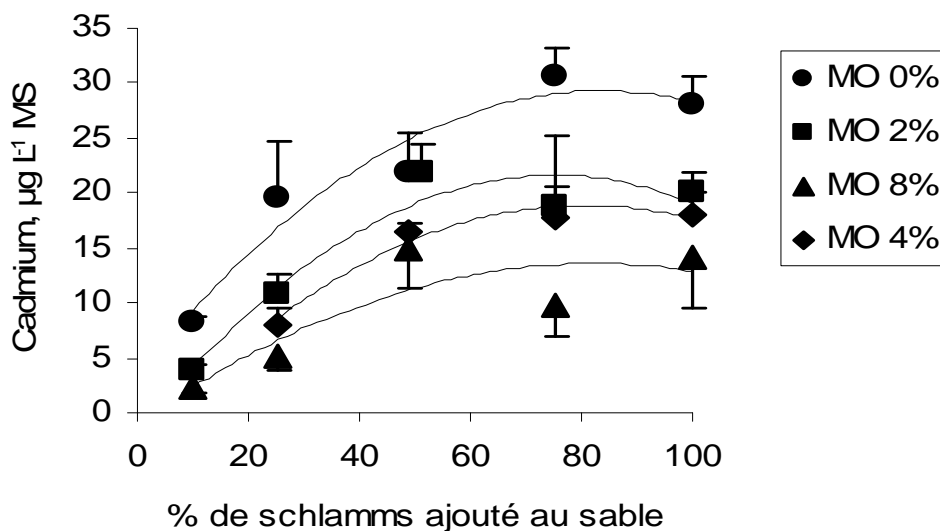
**Figure 8 :** Évolution du pH mesuré dans la rhizosphère du chou en fonction du pourcentage de sable dans le mélange et de l'apport de matière organique

Cadmium extractible ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$  1M) dans la rhizosphère de chou cultivé sur des mélanges schlamms, sable, matière organique



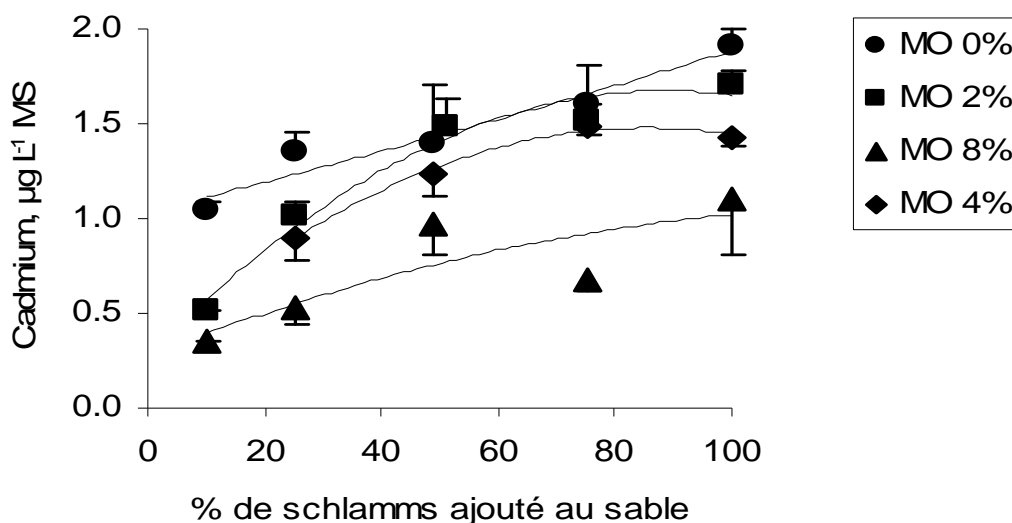
**Figure 9 :** Évolution de la teneur en cadmium extractible (assimilable en première approximation à du cadmium phytodisponible) mesurée dans la rhizosphère du chou en fonction du pourcentage de sable dans le mélange et de l'apport (ou non) de matière organique

Cadmium dans les racines de choux cultivés sur des mélanges schlamms, sable, matière organique



**Figure 10 :** Teneurs en cadmium des racines de choux cultivés sur des schlamms mélangés à du sable et de la matière organique

### Cadmium dans les feuilles de choux cultivés sur des mélanges schlamms, sable, matière organique



**Figure 11** : Teneurs en cadmium des feuilles de choux cultivés sur des schlamms mélangés à du sable et de la matière organique

Les teneurs en cadmium présentées dans les figures 10 (racines de choux) et 11 (feuilles) montrent l'influence d'un ajout de 8% de matières organiques sur l'absorption de cadmium. En effet, quelle que soit la quantité de schlamms dans le mélange avec le sable, l'apport de 8% de MO permet de limiter l'absorption de cadmium par le chou et son stockage que ce soit dans les racines ou les feuilles.

### Conclusions

En conclusion, il est important de noter en premier lieu le fort potentiel agronomique des schlamms (phosphates argileux) ; en effet, leur texture leur permet d'avoir une bonne rétention d'eau qui peut alimenter les cultures pendant plusieurs jours. De plus, le contenu élevé en phosphates fins autorise une nutrition phosphorée des cultures sans crainte de carences, malgré le fait que les phosphates de Taïba sont peu solubles.

La bonne qualité agronomique des schlamms est également liée à la CEC, à la richesse en certains éléments nutritifs, outre P, comme Mg ou certains ETM. Cependant, si la fertilisation phosphatée n'est pas nécessaire, les cultures ont besoin d'un apport en N et K

Il faut également noter que les surfaces des bassins enschlamés constituent des terrains très importants pour les populations locales de certains villages déplacés par l'avancée du front de mine (mine à ciel ouvert). De plus, les activités minières des ICS nécessitent beaucoup d'eau qui est transportée jusqu'à l'usine par des conduites longeant certains bassins cultivés. Il existe dans ces cas-là un accès à l'eau très précieux pour assurer l'irrigation des cultures en contre saison sèche sur ces zones. La valeur des productions est

alors largement supérieure à celles obtenues en conditions pluviales pendant la seule saison d'hivernage.

Cependant, les teneurs élevées en cadmium, fluor et autres ETM peuvent représenter des problèmes pour les cultures et les personnes qui les consomment.

### **Analyse des organes prélevés dans les bassins**

Les analyses des prélèvements de plantes cultivées sur les schlamms, par comparaison avec des témoins récoltés dans les Nyayes de Mboro, ont permis de cerner les problèmes liés à la présence de cadmium dans les sols : cultivées dans les mêmes conditions, certaines variétés et certaines espèces n'absorbent pas du tout les mêmes quantités de cadmium. Il y a une très forte variabilité entre espèces dans l'accumulation des éléments à risque comme Cd et F.

Ainsi nous avons pu déterminer 3 classes de sensibilité des cultures : 1/ des plantes accumulant beaucoup de Cd (Aubergine, Jaxatu, Gombo) ou 2/ peu de Cd (courgette, banane, etc...) et 3/ des plantes intermédiaires, avec des teneurs en Cd se situant de part et d'autre des limites fixées par l'UE (chou, tomate)

Les prélèvements d'organes au champ ont montré qu'il existe une variabilité entre variétés qui peut être estimée pour le chou, mais il n'y a pas assez de répétitions pour déterminer cette variabilité pour l'ensemble des espèces analysées

Il existe aussi une variabilité entre bassins: dans les bassins 7 et 8, les schlamms plus anciens libèrent plus de Cd que les schlamms des bassins 1 et 2. La forte hétérogénéité de la teneur en Cd relevée dans les organes prélevés sur les plantes cultivées dans le bassin 16 reflète bien l'hétérogénéité des stériles qui composent les sols cultivés à cet endroit.

### **Analyses en milieu contrôlé**

Les résultats obtenus montrent une relation entre l'acidification de la rhizosphère induite par la plante et le prélèvement de cadmium : il y a une influence de l'espèce et de la variété sur le prélèvement de Cd, liée au flux de protons entre la racine et la solution du sol et donc le substrat de culture. La fumure minérale a aussi une influence sur l'acidification par le biais de l'absorption de l'azote et nous avons noté une synergie urée - potasse sur le prélèvement de Cd.

L'apport de matière organique dans les mélanges sables-schlamms a montré l'influence du pouvoir tampon du substrat sur la phytodisponibilité du cadmium (ceci explique en partie la différence de teneurs en cadmium entre les plantes cultivées dans le bassin 16 – moindre pouvoir tampon des stériles gréseux - et dans les autres bassins enschlamés - pouvoir tampon des schlamms fins et des argiles-). En dernier lieu, on note une influence de la capacité de translocation dans la plante entre le substrat, le système végétatif et les parties consommées. Par exemple, les feuilles de tomate contiennent plus de cadmium que les fruits. Il doit donc exister une barrière physiologique dans certaines variétés.

### **Choix des cultures pour les bassins des ICS**

Certaines cultures comme l'aubergine, le jaxatu, le gombo., présentent un risque évident, compte tenu de leurs teneurs élevées en cadmium dans les parties comestibles, teneurs supérieures au niveau de la norme de l'Union européenne.

D'autres cultures (choux et tomates) ont des teneurs en Cd dans les parties comestibles très proches des normes. Leur culture ne peut donc être conseillée qu'en prenant en compte les spécificités des bassins et en sélectionnant les variétés et les modes de fertilisation.

Certaines productions présentent des teneurs en cadmium inférieures aux limites définies au niveau international et ne présentent donc aucun problème pour les consommateurs ou même à l'exportation vers l'Europe.

On ne peut donc que conseiller de développer des études pour une sélection des variétés accumulant peu de cadmium, dans leur appareil végétatif mais surtout dans les parties comestibles. Certaines variétés sont utilisées par les agriculteurs en fonction de la saison de culture, la sélection de variétés adaptées devra intégrer cette donnée.

Les scénarios de mise en valeur des bassins à schlamms doivent prendre en compte ces différents résultats ; en particulier, il est indispensable que la gestion des cultures intègre la teneur en cadmium des organes comestibles et que soient exclues certaines variétés.

Il est bien évident que la mise en culture des bassins doit continuer, mais des règles doivent être édictées et suivies par les agriculteurs. La présence d'une assistance de terrain devrait permettre de vulgariser ces messages destinés à minimiser les risques. Une maîtrise de l'utilisation des engrais est nécessaire en évitant au maximum l'utilisation d'éléments acidifiants comme la potasse (ou l'urée avant minéralisation) qui peuvent conduire à un prélèvement plus important de Cd.

L'utilisation des schlamms en tant qu'amendement de sols sableux pour améliorer la rétention d'eau ne doit être autorisée qu'après vérification du pouvoir tampon du mélange - avec ou sans apport de matières organiques - et seulement pour certaines cultures.