

Sécuriser les systèmes de production animale dans les territoires contaminés par la chlordécone – Projet INSSICCA

C Feidt¹, Mahieu² M., Fournier¹ A., Collas¹ C., Delannoy¹ M., Jurjanz¹ S., Thomé³ J.P., Archimède² H., Rychen¹ G.

1 UR AFPA, Université de Lorraine, INRA 54000 Nancy

2 UR0143 Recherches Zootechniques

INRA, Centre Antilles-Guyane, Domaine Duclos – Prise d'eau, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe

3 LEAE Université de Liège, Belgique

Contexte

Les données cartographiques récentes indiquent que près d'1/4 de la superficie agricole utile des deux départements d'outre-mer français (Guadeloupe, Martinique) sont considérés comme modérément ou fortement pollués par la chlordécone (CLD, DAAF Guadeloupe et Martinique). L'élevage de ruminants au pâturage y est pratiqué selon deux modalités qui dépendent essentiellement de sa taille et de ses débouchés. Les troupeaux de taille importante (quelques dizaines à plus d'une centaine d'animaux) sont conduits au pâturage en parcelles clôturées. Les éleveurs concernés sont généralement des exploitants agricoles qui commercialisent leur production via les circuits officiels (coopératives). À l'opposé l'élevage au piquet est couramment pratiqué par des détenteurs d'un petit nombre d'animaux (de 1 à 20) qui ne possèdent pas de surface herbagère justifiant l'investissement que représentent des clôtures. La plupart sont pluriactifs et exploitent des surfaces restreintes et marginales, souvent de façon précaire (bordures de parcelles cultivées, jachères des assolements bananiers, alentours des habitations, parcelles non cultivées etc.). À titre d'exemple, ce type d'élevage concerne plus de 60% du cheptel du "croissant bananier" en Guadeloupe. Une enquête nationale menée depuis 2008 dans les abattoirs antillais a révélé une contamination significative des produits d'origine animale. Entre 2008 et 2010, les contrôles réalisés à l'abattoir départemental du Moule en Guadeloupe ont mis en évidence la présence de bovins contaminés, voire fortement contaminés, dans l'île (concentration de CLD dans les tissus adipeux péri-rénaux comprise entre 3 et 650 $\mu\text{g CLD.kg}^{-1}$ MG ; Lastel, 2015) et en 2011, près de 12 % des carcasses examinées présentaient des valeurs supérieures au seuil réglementaire (LMR), de 100 $\mu\text{g CLD.kg}^{-1}$ de matière grasse, fixé par l'Union européenne. Le rapport ANSES de 2017 sur « L'Exposition des consommateurs des Antilles à la chlordécone, résultats de l'étude Kannari » a permis d'actualiser les données d'exposition à la chlordécone des populations mais aussi de présenter l'influence des modes d'approvisionnements sur les concentrations en CLD retrouvées dans les denrées alimentaires d'origine animale (DAOA) (Rapport ANSES, 2017). Ce rapport indique par exemple qu'une part significative des DAOA analysées, principalement des circuits informels, présentaient un dépassement des valeurs réglementaires autorisées.

Cette situation préoccupante a incité les professionnels des filières ainsi que les acteurs de la recherche et du développement agricole à mettre en place des études visant à comprendre les processus de contamination et le devenir de la CLD dans l'organisme afin de proposer des solutions pertinentes pour garantir la sécurité sanitaire des produits animaux terrestres. La stratégie mise en œuvre comprend à la fois des approches biotechniques et socio-économiques. Le but des approches biotechniques est de proposer des stratégies visant à réduire l'exposition des animaux d'élevage dans les zones contaminées et, en fonction du niveau de contamination résiduel, d'assurer la décontamination des animaux afin d'obtenir des produits conformes (teneurs en CLD < LMR) pour l'alimentation humaine. La finalité des approches socio-économiques consiste à évaluer l'acceptabilité des solutions proposées et leur efficacité économique, dans une optique de résilience des systèmes de production animale. Ces approches qui viennent de débiter en 2018 ne sont pas présentées dans ce document.

Stratégies visant à réduire l'exposition des animaux d'élevage

Il est acquis que la chlordécone issue d'un sol contaminé (nitisol ou andosol) n'est pas retenue par les fractions organiques ou minérales du sol lors des processus digestifs. Ainsi, les travaux de Bouveret et al. (2013) et de Jurjanz et al. (2014) ont montré que la CLD du sol est totalement libérée dans la lumière intestinale et assimilable aussi bien par les ruminants que par l'espèce porcine. Il s'agit donc d'identifier et de recommander les pratiques de pâturage qui permettent de limiter au maximum les quantités de sol ingérées involontairement. Plusieurs études (Fries et al., 1982 ; Healy, 1968 ; Jurjanz et al., 2012) ont mis en évidence l'effet du chargement au pâturage sur l'ingestion de sol : d'autant plus faible est l'offre fourragère, d'autant plus élevée est la proportion de sol dans l'ingéré total. Ainsi, une offre fourragère limitée oblige les animaux à brouter de plus en plus près du sol, et augmente le risque d'ingestion de sol de surface ou d'herbe souillée. Néanmoins cette généralité se décline assez différemment d'un système d'élevage à un autre ce qui rend difficile une extrapolation des systèmes de pâturage en conditions tempérées au système antillais au piquet. Une série d'expérimentations a été mise en place pour évaluer l'ingestion de sol par des bovins créoles au piquet disposant d'une large gamme d'offres fourragères. Il convient aussi de rappeler que les conditions antillaises sont caractérisées par des variations importantes de l'humidité du sol. Cette humidité à la surface du sol pâturé détermine l'ampleur des conséquences du piétinement de l'animal et du glissement de la chaîne d'attache sur la salissure de l'herbe.

La détermination de l'ingestion de sol au pâturage fait appel à des méthodologies complexes qui reposent sur la détermination de l'ingestion totale de matière sèche quotidienne, la connaissance de l'ingestion de matière organique, sa digestibilité ainsi que le suivi de marqueurs indigestibles adéquats afin de pouvoir distinguer les apports de sol des apports de végétaux ingérés (Jurjanz et al, 2012). Afin d'être appliquées au contexte antillais, il a été nécessaire d'adapter les approches méthodologiques utilisées en métropole. Dans les expérimentations menées *in situ* chez le bovin en 2016 et 2017 le titane s'est révélé pertinent comme marqueur de l'ingestion de sol en conditions antillaises. Les premiers résultats ont confirmé l'hypothèse selon laquelle les pratiques d'élevage au piquet conduisent à des ingestions quotidiennes de sol significatives : lorsque l'offre fourragère était limitée, les ingestions de sol représentaient 10% de la matière sèche totale ingérée, soit 100 g de sol pour 100 kg de poids vif. Une relation inverse a été établie entre l'offre fourragère et l'ingestion de sol. De manière concrète il s'agira de proposer des pratiques d'élevage qui ne limitent pas l'offre fourragère : ainsi lorsque l'offre fourragère est abondante, l'ingestion de sol représentait moins environ 2% de la matière sèche ingérée quotidiennement (Collas et al, en préparation). Ces études menées chez l'espèce bovine devront être étendues aux petits ruminants et chez l'espèce porcine.

Ainsi, dans les zones contaminées, une première recommandation consiste à éviter de conditions de restriction significative de l'offre fourragère afin de réduire les risques liés à l'ingestion de sol contaminé. En effet, la CLD issue de l'ingestion involontaire de sol contaminé se retrouvera inévitablement dans l'organisme animal et le contaminera.

Une approche complémentaire visant à séquestrer la chlordécone dans la lumière intestinale durant les processus digestifs a également été envisagée. L'étude a consisté à compléter un aliment concentré avec des charbons actifs (CA) commerciaux (Yehya, 2017), et de l'administrer parallèlement à un aliment contenant du sol contaminé. L'hypothèse scientifique était basée sur une possible séquestration de la CLD par les CA dans la lumière intestinale, empêchant ainsi son absorption. Les premiers résultats ont montré l'absence d'effet de cette administration sur l'absorption de la chlordécone. Ceci pourrait être expliqué par la durée relativement courte du transit digestif, limitant le temps de contact de la chlordécone libérée avec le CA, et donc sa séquestration

Stratégies visant à décontamination les animaux d'élevage afin d'obtenir des produits conformes pour le consommateur

Dans le cadre des plans de contrôle et des mesures de terrain, les concentrations en CLD ont été déterminées dans les matrices cibles telles que le tissu adipeux péri-rénal (TAPR, matrice de référence en matière de contrôle), le foie, le muscle et le sang de bovins. Globalement, les résultats d'analyse ont révélé que les concentrations de CLD dans le foie était en moyenne 4 fois plus élevées que celles du TAPR et 8 fois plus celles dans la hampe (Lastel, 2015) ce qui témoigne de la forte affinité de ce polluant dans cet organe. Les TAPR étaient en moyenne 2 fois plus concentrés en CLD que le muscle. Une forte corrélation a été établie entre les tissus « foie », « muscle » et « TAPR » (R^2 entre 0,7-0,9). Les corrélations entre les concentrations sanguines et celles dans les autres tissus ont été sensiblement moins bonne (R^2 entre 0,4 - 0,7). Cependant il est clairement ressorti des calculs de corrélations qu'une concentration sérique de CLD inférieure à 15 ng.g^{-1} était synonyme de concentrations inférieures à la LMR dans le TAPR. Par ailleurs, ces résultats ont mis en évidence un besoin urgent de définir les paramètres toxicocinétiques de la CLD chez les animaux d'élevage afin de préciser le devenir de la CLD dans l'organisme et d'envisager des stratégies de décontamination adéquates.

Des études de toxicocinétique aux stratégies de décontamination

Des travaux récents issus du programme INSSICCA (Lastel et al., 2016, Fournier et al. 2017) ont permis de caractériser le devenir de la molécule dans l'organisme des ruminants. Dès lors que l'animal est retiré d'une parcelle contaminée, les demi-vies de la CLD dans l'organisme sont relativement courtes (entre 20 et 40 jours selon les espèces) et permettent d'envisager des périodes de décontamination des animaux sur des pas de temps compatibles avec les pratiques d'élevage. Il faut rappeler que l'application d'une période de décontamination de 3,3 fois le temps de demi-vie permet d'éliminer 90% de la charge contaminante de l'organisme des animaux. La construction d'abaque et d'équations par espèce est en cours et elle permettra de déterminer les temps de décontamination nécessaires en fonction de la concentration sanguine initiale et de la valeur finale visée. Pour l'espèce bovine, les tests de validation sont envisagés pour 2018. Un groupe de bovins présentant des concentrations sanguines de CLD supérieures à 15 ng.g^{-1} serum sont extraits de parcelles contaminées pour une période qui sera fonction de la teneur sanguine initiale et des temps de demi-vies chez le bovin. A l'abattage, les niveaux de CLD seront déterminés dans les différentes matrices d'intérêt et permettront de démontrer la pertinence du modèle.

Les travaux en cours ne concernent pas uniquement la chlordécone mais également ses métabolites. Un développement analytique vient d'être réalisé en vue de quantifier simultanément la CLD et le chlordécol (CLDOH) sous leurs formes libres et conjuguées. Les méthodes ont été validées sur trois matrices animales (foies, fèces et urines). L'analyse s'est effectuée par chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) et l'extraction par des méthodes de type QuEChERS. (Quick, Easy, Cheap, Efficient, Rugged and Safe) (Saint Hilaire et al., 2018). Ces approches analytiques sont pleinement intégrées aux études visant à mieux comprendre les mécanismes de détoxification de la CLD chez les animaux de rente.

Les stratégies de décontamination évoquées ci-dessous permettent d'obtenir des DAOA saines pour le consommateur mais nécessite l'usage de parcelles « non contaminantes » pour accueillir les animaux en phase de décontamination. Ces parcelles peuvent être des parcelles non contaminées ou des parcelles où la CLD n'est plus accessible, car séquestrée.

Stratégies visant à séquestrer durablement la CLD dans les parcelles contaminées

L'objectif global est d'évaluer l'efficacité de stratégies de séquestration de la CLD dans des sols contaminés par l'usage de charbons actifs (matériaux ayant subi une pyrolyse et un traitement d'activation) ou de biochars (matériaux ayant subi une pyrolyse uniquement). Pour répondre à cet objectif plusieurs verrous ont été levés. Tout d'abord il était nécessaire d'obtenir un panel de biochars et de charbons actifs aux caractéristiques variées. Un panel de matrices carbonées a été construit en faisant varier la nature des précurseurs (noix de coco, sargasses, chêne), et les techniques d'activation (H_3PO_4 , CO_2 , H_2O). Cette étape de production a permis d'obtenir des charbons actifs et biochars possédant des propriétés physiques diverses. Ce traitement d'activation permet d'améliorer le réseau poreux déjà amorcé durant la pyrolyse, mais également d'en améliorer les qualités (taille de pores).

Pour tester l'effet de séquestration de chaque matrice, des sols artificiels ont été fabriqués conformément au protocole défini par l'OCDE (OECD, 1984). L'ensemble de ces sols ont été contaminés à hauteur de 5 μg de CLD par g de sol sec. Cette concentration a été choisie pour représenter le niveau d'un sol hautement contaminé dans le contexte antillais. Sept sols contenant de la tourbe ont été amendés par 5% (masse sèche) de biochars et charbons actifs, 1 sol contenant de la tourbe n'a pas été amendé. Aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre les 3 sols amendés par les biochars produits à 700°C et les sols dépourvus d'amendement (Yehya et al., 2018). Les sols amendés avec chaque charbon actif présentent, quant à eux, des niveaux de bioaccessibilité bien plus faibles (0 à 30% de bioaccessibilité). Les charbons actifs de chêne et de noix de coco, activés à l'acide phosphorique, représentent à ce jour les meilleurs candidats pour la séquestration de la CLD (Delannoy et al., 2018). Les premières approches *in vivo* ont permis de conforter les résultats de bioaccessibilité. Ainsi, des essais réalisés chez de jeunes ruminants ont montré qu'il est possible de séquestrer fortement la CLD avec des matrices hautement carbonées. Ces essais ont été réalisés dans des conditions optimales de séquestration, notamment en utilisant des sols artificiels, et doivent donc être confirmés (Yehya et al., 2017).

Au regard des coûts de production des charbons actifs, il paraît peu réaliste d'appliquer ces matrices hautement carbonées sur des grandes surfaces agricoles. Par contre, il pourrait être envisageable, à terme, d'incorporer du charbon actif sur des parcelles spécifiques, destinées par exemple à la décontamination des animaux.

De manière globale, les résultats présentés ci-dessus, constituent des bases scientifiques solides pour la mise en place de systèmes de production sécurisés. Il apparaît clairement que l'offre fourragère doit être abondante pour limiter l'exposition des animaux. Les travaux sur la connaissance de devenir de la CLD dans l'organisme (corrélation entre tissus, dynamique sanguine, métabolisme) permettent d'envisager, sur des durées compatibles avec l'élevage des animaux, des stratégies de décontamination pertinentes. Enfin, les stratégies de séquestration de la CLD dans les sols antillais par des CA sont prometteuses mais du fait des coûts de production des CA ne pourront être appliquées que sur des parcelles choisies et de taille raisonnable.

Un site internet dédié au programme de recherche INSSICCA a été également développé (INSSICCA.fr). Cet outil de communication a pour objectifs (i) de capitaliser les résultats scientifiques obtenus par les partenaires INSSICCA et (ii) d'informer les acteurs professionnels ainsi que les consommateurs en termes de vulgarisation des résultats.

Références bibliographiques

Bouveret C., Rychen G., Lerch S., Jondreville C., Feidt C., 2013. Relative bioavailability of tropical volcanic soil-bound Chlordane in piglets. *J. Agric. Food Chem.*, 61 (38), 9269-9274.

- Delannoy M., Yehya S., Techer D., Razafitianamaharavo A., Richard A., Caria G., Baroudi M., Montargès-Pelletier E., Rychen G., Feidt C., 2018. Amendment of soil by biochars and activated carbons to reduce chlordecone bioavailability in piglets, *Chemosphere (in press)*
- Fournier A., Feidt C., Lastel M.-L., Archimède H., Thome J.-P., Mahieu M., Rychen G., 2017. Toxicokinetics of chlordecone in goats: Implications for risk management in French West Indies. *Chemosphere*, 171, 564-570.
- Fries G. F., Marrow G. S., Snow P. A., 1982. Soil ingestion by dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 65 (4), 611-618.
- Healy W. B., 1968. Ingestion of soil by dairy cows. *N. Z. J. Agric. Res.*, 11, 487-499.
- Jurjanz S., Feidt C., Pérez-Prieto L. A., Ribeiro Filho H. M. N., Rychen G., Delagarde R., 2012. Soil intake of lactating dairy cows in intensive strip grazing systems. *Animal*, 6, 1350-1359.
- Jurjanz S., Jondreville C., Mahieu M., Fournier A., Archimède H., Rychen G., Feidt C., 2014. Relative bioavailability of soil-bound chlordecone in growing lambs. *Environ. Geochem. Health*, 36, 911-917.
- Jurjanz, S., Collas, C., Lastel, M.-L., Godard, X., Archimède, H., Rychen, G., Mahieu, M., Feidt, C., 2017. Evaluation of soil intake by growing Creole young bulls in common grazing systems in humid tropical conditions. *Animal*, 11 (8), 1363-1371.
- Lastel, M.-L., 2015. Chlordécone et filières animales antillaises – De la distribution tissulaire aux stratégies de décontamination chez les ruminants. Thèse de Doctorat, Université de Lorraine.
- Lastel, M.-L., Lerch, S., Fournier, A., Jurjanz, S., Mahieu, M., Archimède, H., Feidt, C., Rychen, G., 2016. Chlordecone disappearance in tissues of growing goats after a one month decontamination period - effect of body fatness on chlordecone retention. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (4), 3176-3183.
- Rapport ANSES 2017. Exposition des consommateurs des Antilles au chlordécone, résultats de l'étude Kannari.
- Saint-Hilaire, M., Inthavong, C., Bertin, T., Lavison-Bompard, G., Guérin, T., Fournier, A., Feidt, C., Rychen, G., Parinet, J., 2018. Development and validation of an HPLC-MS/MS method with QuEChERS extraction using isotopic dilution to simultaneously analyze chlordecone and chlordecol in animal livers *Food Chemistry*, 252 (-), 147-153.
- Yehya S, 2017. Modulation de l'absorption intestinale de la chlordécone (CLD) par l'utilisation de substances séquestrantes. Application à l'élevage en zones contaminées. Thèse de Doctorat, Université de Lorraine.
- Yehya, S., Bakkour, H., Eter, D., Baroudi, M., Feidt, C., 2017. Adsorption isotherm and kinetic modeling of chlordecone on activated carbon derived from dates stones. *Journal of Applied Sciences Research*, 13 (2), 20-28.
- Yehya, S., Delannoy, M., Fournier, A., Baroudi, M., Rychen, G., Feidt, C., 2017. Activated carbon, a useful medium to bind chlordecone in soil and limit its transfer to growing goat kids. *PLOS ONE*, 12 (7), e0179548.