



Programme REBECCA

Répartition de la chlordécone dans les composantes des biomasses aériennes et souterraines de cinq variétés de canne à sucre dans un sol volcanique pollué de Guadeloupe

Pauline Marie et Jean-Louis Chopart

Juillet 2012

Programme REBECCA - Note Scientifique n°10 - Cirad

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier sincèrement :

- *Magali Lesieur-Jannoyer du Cirad Martinique (PRAM) qui, ayant fait les premières études sur le sujet à la Martinique, a donné à JL Chopart des conseils utiles à l'élaboration du protocole d'étude et des informations sur ses premiers résultats,*
- *Patrice Jacquet, Bernard Marseille et Frantz Imambakas qui ont contribué de façon consistante au travail de terrain et de laboratoire,*
- *Le laboratoire départemental de la Drôme (LDA26) qui a effectué les analyses de chlordécone, en respectant les délais courts qu'on lui avait demandés*
- *Le Programme FEDER de la communauté Européenne, qui a financé la plus grande partie du programme REBECCA, et donc les coûteuses analyses de chlordécone*

Sans ces personnes physiques et morales, l'étude n'aurait pas pu prendre sa forme actuelle.

Résumé

Une étude menée en Guadeloupe dans le cadre du programme REBECCA a visé à caractériser la teneur et la répartition de la chlordécone (CLD) dans les différentes composantes de la biomasse de cannes fibreuses potentiellement utilisables comme combustible afin d'évaluer l'impact environnemental d'une filière canne-énergie.

Les prélèvements ont été réalisés sur les essais variétaux du Fromager. Sur chaque essai, les prélèvements ont été effectués sur les deux meilleures variétés identifiées préalablement : TC8 et F176, WI81456 et WI86015 ainsi que sur une variété témoin (R579) commune aux deux essais. Les prélèvements ont été réalisés sur des cannes âgées de 8, 10 et 12 mois. Des échantillons de parties aériennes et de parties souterraines ont été prélevés et analysés par un laboratoire d'analyse agréé.

Après 8 mois de culture, il existe un très fort gradient de concentration en CLD au sein de la plante. Les concentrations les plus fortes sont localisées dans les parties souterraines ainsi que dans la partie basse de la tige (entrenœuds 1 à 5). Les racines ont une teneur 200 à 500 fois plus élevée que celle des premiers entrenœuds aériens. Au sein même de l'appareil racinaire, il existe des gradients de concentration allant des racines fines profondes jusqu'à celles situées à proximité immédiate des tiges. Les racines semblent constituer un filtre un piège et limiter la propagation de la CLD dans la plante.

Les résultats obtenus dans nos conditions expérimentales, avec des mesures à l'échelle métrique ne permettent pas de mettre en évidence une relation entre la contamination du sol et celle de la plante. Il ne semble pas non plus y avoir de relation directe entre la teneur en fibres totale des différentes composantes de la biomasse des variétés étudiées et leur contamination par la CLD. Le très fort gradient de concentration, depuis les racines jusqu'aux extrémités des tiges, se retrouve aussi lorsqu'on exprime les résultats en g/ha de culture. Bien que la biomasse des racines soit très inférieure à celle des parties aériennes, elle constitue la composante qui stocke la plus grande quantité de CLD avec 25 g/ha contre 0,036 g/ha pour les tiges aériennes.

Les racines n'étant pas exportées, la CLD reste dans le sol. Seule une faible quantité de CLD se retrouve dans la biomasse destinée à la combustion ce qui limite, à priori, les risques liés à la CLD lors de la combustion.

Introduction

Un programme de recherche actuellement en cours (REBECCA : REcherche Biomasse Energie Canne à CApesterre) vise à définir la possibilité de produire de l'électricité à partir de la combustion d'une biomasse issue de la canne à sucre cultivée à cet effet dans le Sud de Basse-Terre en Guadeloupe.

Cependant, les sols situés dans cette zone sont sujets à une forte contamination causée par la molécule de chlordécone (CLD). Cette molécule, insecticide organochloré de synthèse, a été utilisée aux Antilles de 1972 à 1993 pour lutter, notamment, contre le charançon du bananier. Son utilisation a entraîné une contamination des sols (Cabidoche et al., 2011). La persistance de cette pollution dans les sols de Guadeloupe a été estimée et varie de un à quatre siècles selon la nature des sols (Cabidoche et al, 2009). Le transfert de la molécule dans les plantes n'a été étudié que très récemment et très peu de références bibliographiques sont disponibles à ce sujet (Cabidoche et Lesueur Jannoyer, sous presse). Des premiers travaux sur la canne à sucre ont néanmoins déjà été effectués à la Martinique (Lesueur-Jannoyer et al., 2011 ; Cabidoche, Lesueur-Jannoyer, 2011). Ces travaux montrent en particulier qu'il existe, en culture en pots, un fort gradient de concentration dans les parties aériennes depuis la base de la tige jusqu'aux feuilles.

C'est pourquoi, en partant de ces premiers résultats et dans le cadre du programme REBECCA, des travaux sur la mobilisation de la molécule par la canne en culture de plein champ, ont été réalisés, afin d'évaluer les risques environnementaux liés à cette molécule dans la future filière canne énergie.

L'étude vise à estimer la quantité de CLD présente dans les différentes parties de la plante, y compris les racines, avec une évaluation de la fluctuation éventuelle en fonction des variétés et de l'âge de la culture. Il faudra, in fine, qu'il y ait le moins possible de CLD présente dans la biomasse brûlée. Le travail a consisté à mesurer le taux de contamination dans les sols et à évaluer les teneurs en CLD dans les différents entrenœuds des tiges afin d'estimer les quantités de CLD absorbées par la plante ainsi que les hauteurs de migration. Parallèlement, des mesures de teneurs en CLD dans le système racinaire ont été effectuées afin d'avoir une première évaluation du transfert de la molécule du sol vers l'ensemble des composantes de la canne.

I - Matériel et méthode

I.1 Dispositif expérimental

Les mesures ont été faites sur deux des essais variétaux du Fromager (V3 et V4) dans le sud de la Guadeloupe (latitude : 16°03' N, longitude : 61°34' W, altitude 100 m). Ces deux essais sont situés sur des sols dont les caractéristiques sont représentatives de la zone. Les sols sont de type andosol (MO : 7.6 %, pH eau : 6.1, teneur en azote total 2 à 3 mg/kg, P2O5 assimilable : 3.7 mg/100g) et la contamination par la chlordécone dans les 30 premiers centimètres de sol est représentative des contaminations de la zone.

Les dispositifs V3 et V4 comprennent trois répétitions en blocs de Fisher avec respectivement six et sept variétés et un témoin. On dispose donc de 21 parcelles élémentaires pour V4 et 22 pour V3. Chaque parcelle est composée de quatre lignes de six mètres de long avec un

interligne de 1,60 mètre. Sur chaque essai, les prélèvements destinés à l'analyse CLD ont eu lieu sur les deux meilleures variétés identifiées à partir des évaluations non destructives ainsi que sur le témoin R579, largement cultivé en Guadeloupe. Les deux variétés retenues sur l'essai V3 sont la TC8 et la F176 issues de la collection du Cirad Guadeloupe. Sur l'essai V4, les prélèvements ont eu lieu sur les variétés WI86015 et WI81456 qui proviennent du WICSCBS de Barbade.

I.2 Prélèvement du matériel végétal

I.2.1 Evaluation des teneurs en chlordécone dans différentes composantes de la plante et de la hauteur de migration dans des cannes âgées de 8 et 12 mois

Sur chaque parcelle, à trois endroits différents, on a prélevé une canne en coupant à la base de la tige. Les cannes ont été placées sur une bâche pour éviter tout contact avec le sol. Sur chaque tige, on a séparé les parties dites tiges usinables et les parties sommitales. La limite était située à quatre nœuds en dessous du dernier ochréa visible. Les tiges ont ensuite été sectionnées de la manière suivante :

- Entre-nœuds 1 à 5
- Entre-nœuds 6 à 10
- Entre-nœuds 11 à 20
- Entre-nœuds >20

Suite aux résultats obtenus sur les essais V3 à 8 et 12 mois et sur l'essai V4 à 8 mois, montrant de fortes concentrations au niveau de la base des tiges, un compartiment supplémentaire des dix premiers centimètres des tiges aériennes (correspondant à la hauteur de coupe) a été évalué sur l'essai V4 à 12 mois.

Les parties souterraines des tiges correspondantes ainsi qu'un échantillon de racines superficielles situées dans un horizon de sol compris entre 0 et 20 cm ont aussi été prélevés.

Sur chaque parcelle, les tronçons de même position sur la tige ont ensuite été regroupés. On disposait donc de trois tronçons d'un même compartiment par parcelle, soit neuf tronçons de ce compartiment par variété. Les racines superficielles ont aussi été regroupées par variété sur un même bloc.

Chacun des échantillons a été rincé à l'eau de façon à enlever tout résidu de terre puis séché à l'étuve (60°C pendant 24 heures, puis à 85°C pendant 48 heures) avant d'être pesé. L'augmentation de la température s'est faite progressivement pour éviter que le sucre contenu dans les tiges soit extrait sous l'effet de trop fortes températures. Les tronçons ont ensuite été broyés grossièrement puis finement (broyage 1 mm) en nettoyant bien l'appareil entre chaque échantillon. Le broyage a été effectué dans l'ordre croissant des teneurs en chlordécone, de l'extrémité des tiges à la base, afin d'éviter toute contamination du matériel.

Après avoir été débarrassées de toute trace de terre, les racines ont été pesées en frais puis mises à l'étuve à 60°C pendant 48 heures avant d'être repesées et broyées finement.

I.2.2 Evaluation des teneurs en chlordécone dans les parties souterraines et dans les bases des tiges aériennes dans des cannes âgées de 10 mois

Suite aux premiers résultats obtenus à 8 mois montrant une forte teneur en CLD dans les racines, l'objectif de cette manipulation était d'évaluer les teneurs en CLD des parties souterraines (racines grosses et fines, tiges souterraines) et de la base de la tige (dix premiers centimètres).

Sur chaque parcelle on a prélevé :

- La base des tiges aériennes entre 0 et 10 cm de la surface du sol
- Les tiges souterraines : entre la bouture et la surface
- Les racines rattachées aux touffes
- Quatre compartiments de sol, à deux distances et deux profondeurs différentes, contenant les racines grosses et fines des cannes.

Prélèvement des racines grosses et fines :

La biomasse racinaire a été prélevée par la méthode des monolithes (Chopart, 1999, Chopart, 2004). Cette méthode a permis d'obtenir une estimation de la biomasse racinaire présente entre la surface et 30 cm de profondeur sur les 9 parcelles étudiées, dans le but d'évaluer les teneurs en CLD dans les racines et d'estimer les quantités de la molécule par unité de surface.

Dans l'interligne, quatre cubes de sol de 15 centimètres de côté ont été prélevés à deux distances du rang de canne, à deux profondeurs 0-15 cm et 15-30 cm (figure n° 1) et à deux distances par rapport au centre du rang:

- entre 18 à 33 cm (représentatif de l'espace entre 10 et 40 cm du rang)
- entre 53 et 68 cm (représentatif de l'espace entre 40 et 80 cm du rang)

Les racines situées à proximité immédiate du rang de canne, entre 0 et 10 cm de part et d'autre du rang et entre 0 et 15 cm de profondeur, ont été prélevées dans le monolithe de 15 cm de profondeur, 20 cm de largeur et d'environ 30 cm de long qui contenait la touffe de canne puis traitées comme les racines issues des monolithes.

Dans l'horizon sous-jacent, entre 15 et 30 cm de profondeur sous le rang de canne, la biomasse racinaire a été considérée comme identique à celle de la distance 18- 33 cm à la même profondeur. Les racines dépassant du monolithe de sol lors de l'extraction de celui-ci ont été soigneusement sectionnées de façon à ne garder que celles contenues dans le volume étudié. Au total, 36 monolithes de sol de 15 cm d'arête ont été prélevés.

Les racines ont été extraites des monolithes par tamisage (mailles de 2 mm), sous l'eau, puis lavées minutieusement afin qu'il ne reste aucune trace de terre (Chopart, 2004). Elles ont ensuite été séparées en deux catégories: racines fines (diamètre inférieur à 1mm) et racines grosses (photo 1).



Photo 1 : Echantillon de racines après séparation entre racines fines (diamètre <1 mm) et grosses (diamètre >1mm).

Elles ont ensuite été placées brièvement sur un papier absorbant pour éliminer la pellicule d'eau superficielle présente après lavage, avant d'être pesées en frais. Enfin, les échantillons ont été placés à l'étuve à 60°C pendant 48 heures. Les échantillons racinaires des trois répétitions d'une même variété ont été regroupés entre eux car la quantité de matière sèche n'était pas suffisante pour les analyses de Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) et les analyses chlordécone.

Ces mesures ont permis d'obtenir une estimation de la biomasse totale par unité de surface au sol, pour des cannes plantées en rangs de 1.6 m. Pour cela, les résultats bruts obtenus à différentes profondeurs et distances du rang ont été pondérés en fonction de leur volume représentatif (figure 1).

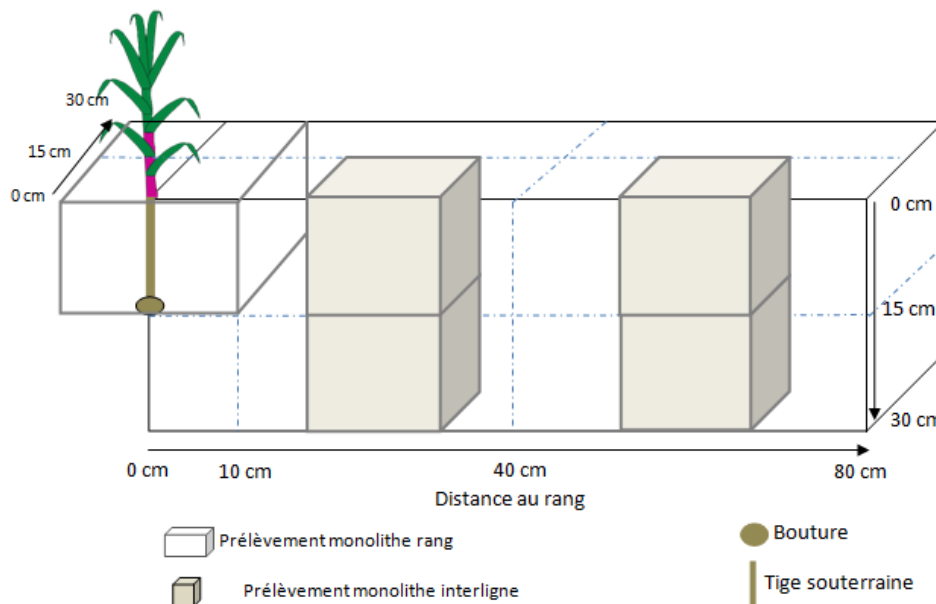


Figure 1 : Position des monolithes de mesures de densités racinaires par rapport au centre du rang et espaces représentatifs de chaque monolithe.

Un volume de 15 cm de large et de 80 cm de long, couvrant un demi-interligne sur 30 cm de long et 30 cm de profondeur a été considéré comme l'unité de base représentative, prenant en compte les gradients verticaux, transversaux et longitudinaux, sur 30 cm de profondeur. La biomasse racinaire (en t/ha) a été estimée à partir de cet espace représentatif. La biomasse racinaire située en dessous de 30 cm de profondeur n'a pas été évaluée. Evidemment, elle existe, mais les biomasses sont moindres ainsi que, à priori, les concentrations du sol en CLD.

Cette estimation a été réalisée afin de pouvoir calculer ultérieurement la biomasse racinaire en t/ha à partir des résultats obtenus sur les 30 premiers centimètres et d'évaluer les quantités de CLD en t/ha en fonction des différents compartiments étudiés.

Echantillons de sol :

Chaque échantillon de sol a été pesé directement après le prélèvement. Pour chaque bloc, un échantillon représentatif de 50 grammes a été prélevé pour les mesures d'humidité et un échantillon de 100 grammes a été prélevé pour l'analyse de chlordécone. L'échantillon de 50 grammes a été séché à l'étuve à 85 °C pendant 48 heures. Les échantillons de 100 grammes d'un même traitement, issus de prélèvements de même profondeur ont été regroupés et envoyés au laboratoire pour analyse.

Prélèvement des racines rattachées aux touffes et bases des tiges aériennes :

Un prélèvement de touffe comprenant la partie aérienne et la partie souterraine a été réalisé sur chaque parcelle. Les dix premiers centimètres des parties aériennes ont été séparés des parties souterraines. Les racines rattachées à la touffe ont été coupées et traitées comme des échantillons racinaires dit près de la touffe. Seules les grosses racines ont été gardées. Les échantillons ont été traités comme précédemment.

I.3 Traitement des échantillons

I.3.1 Analyses SPIR-NIRS

Des analyses SPIR ont été réalisées pour voir s'il existait ou non des relations entre la composition en fibre des échantillons et leur teneur en chlordécone.

L'ensemble des échantillons a été passé au Spectromètre (Spectrastar 2400) sous forme de fine poudre (1mm). Avant chaque phase de mesure, l'appareil a été testé avec un échantillon étalon (identique pour toute la durée du projet). La faible quantité de matière broyée a obligé à prendre des précautions spécifiques.

I.3.2 Analyses chlordécone

Les échantillons de sol et des différents compartiments de cannes ont ensuite été envoyés au Laboratoire Départemental de la Drôme (LDA 26), un des seuls en France à être agréé pour cette analyse. Les molécules recherchées lors de ces analyses sont la chlordécone et son dérivé le 5b hydro chlordécone. Les analyses ont été réalisées au moyen des méthodes CMO MT06 pour les échantillons de sol et par chromatographie liquide haute performance couplé à la spectrométrie de masse (HPLC/MS) pour les échantillons végétaux. Etant donné les très faibles teneurs en 5b hydro chlordécone, seuls les résultats de teneur en chlordécone seront présentés par la suite.

II – Résultats

II.1 – Evaluation des teneurs en chlordécone dans les différentes composantes de la plante

Les teneurs en chlordécone du sol et des différentes parties aériennes et souterraines de quatre variétés de cannes fibres et de la variété témoin ont été déterminées à 8 et 12 mois et figurent dans les tableaux 1 et 2. Pour une meilleure lisibilité, les teneurs en CLD des tiges souterraines et des différents entrenœuds présentées dans les tableaux 1a et 1b ont été repris sous forme d'un graphique dans la figure 2.

Les teneurs en CLD mesurées dans les échantillons de sol des deux essais sont élevées et représentatives des concentrations rencontrées dans les sols de la zone d'étude (tableau 1).

Tableau 1: Teneurs en chlordécone, en $\mu\text{g}/\text{kg}$ de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V3 à 8 mois (a) et V4 8 mois (b). Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

(a)

	R579	TC8	F176
Sol (0-20 cm)	7087(a)	5963(a)	6233(a)
Racines (0-20 cm)	10565(a)	8951(a)	6136(a)
Tiges souterraines	814(a)	955(a)	875(a)
Entrenœuds 1-5	10(a)	23(a)	14(a)
Entrenœuds 6-10	1,0(a)	2,0(a)	2,7(a)
Entrenœuds 11-20	1,3(a)	2,3(a)	4,0(a)

(b)

	R579	WI86015	WI81456
Sol (0-20 cm)	9817(b)	12140(a)	11420(a)
Racines (0-20cm)	9092	7389	7992
Tiges souterraines	599(a)	441(a)	541(a)
Entrenœuds 1-5	28(a)	35(a)	45(a)
Entrenœuds 6-10	2,3(a)	4,7(ab)	6,3(b)
Entrenœuds 11-20	6,0(a)	8,7(a)	8,3(a)

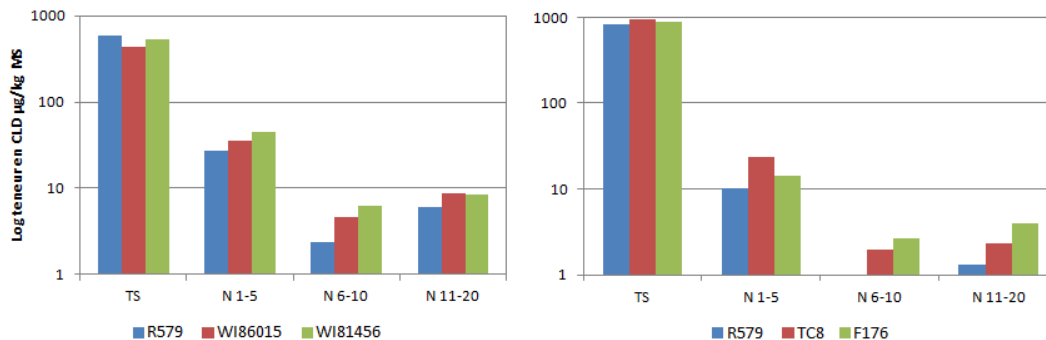


Figure 2: Teneur en chlordécone (log $\mu\text{g}/\text{kg}$ MS) dans les composantes des différentes variétés de cannes étudiées sur V3 et V4 à 8 mois.

Tableau 2: Teneurs en chlordécone, en µg/kg de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V3 à 12 mois. Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

	R579	TC8	F176
Sol (0-20 cm)	ND	ND	ND
Racines (0-20 cm)	12574(a)	10089(a)	8491(a)
Tiges souterraines	797(a)	450(a)	569(a)
nœuds 1-5	57(a)	44(a)	77(a)
nœuds 6-10	5,3(a)	5,0(a)	2,0(a)
nœuds 11-20	2,0(a)	7,0(a)	1,7(a)

Il existe un très fort gradient de concentration en CLD entre les racines et les parties supérieures des tiges sur les cannes âgées de 8 et 12 mois. A l'âge de 8 mois, la concentration en CLD dans les parties souterraines des tiges était située entre 15 (V4) et 55 fois (V3) supérieure à celle des premiers entre-nœuds aériens (tableau 1). Les racines avaient donc une teneur en CLD environ dix fois supérieure à celle des tiges souterraines et entre 200 et 500 fois supérieure à celle des parties basses des tiges, avec une valeur d'environ 7 à 9 mg/kg (tableau 1). A l'âge de 12 mois, les tiges souterraines étaient 10 fois plus contaminées (V3) que les premiers entrenœuds des tiges aériennes. Les racines avaient des teneurs en CLD presque 200 fois supérieures à celles des entrenœuds 1 à 5 (tableau 2). A 8 et 12 mois, il y a donc un très fort gradient de concentration de CLD entre les racines, qui absorbent et stockent la CLD, et la partie basse des tiges (entre 200 et 500). Il semblerait que les parties souterraines sont contaminées à des niveaux stables entre 8 et 12 mois (peu de différence entre les 2 dates pour un même compartiment, alors que les parties aériennes montrent une légère augmentation en teneur de CLD avec le temps L'effet variétal est peu visible, y compris sur les parties aériennes. Des résultats de teneurs en chlordécone, plus précis, obtenus sur les biomasses de trois variétés de cannes âgées de 10 mois (essai V4) restant sur ou dans le sol sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Teneurs en chlordécone, en µg/kg de matière sèche du sol, des racines, des tiges souterraines et aériennes sur l'essai V4 à 10 mois. Les chiffres d'une même ligne suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents suivant le test de Newman-Keuls au seuil de 0.05.

		R579	WI86015	WI81456
Sol	0-15 cm	9192(a)	7220(a)	7900(a)
	15-30 cm	3103(b)	11380(a)	13543(a)
Racines fines	0-15 cm	28683	40287	30697
	15-30 cm	49205	54914	60720
Racines grosses	0-15cm	16313	11710	13291
	15-30cm	21031	13756	18500
Racines attachées touffe		10848(a)	6172(a)	5553(a)
Tiges souterraines		1012(a)	1690(a)	1017(a)
Bases tiges (10 cm)		449(a)	358(a)	190(a)

Les teneurs en CLD du sol sont représentatives des teneurs rencontrées dans la zone. Il n'y avait pas de différence significative de teneurs en CLD entre les parcelles, excepté pour

l'horizon 15-30 de la variété R579 qui a une concentration nettement inférieure à celles des autres parcelles et profondeurs, pour des raisons non élucidées et sans doute liées à la variabilité aléatoire de la teneur en CLD dans le sol et à l'histoire culturale . Il y a eu de forts écarts de concentration en CLD entre :

- les racines et la base des tiges aériennes avec un rapport moyen de 100 environ.
- les racines (fines comme grosses) situées dans l'horizon le plus profond (15-30 cm) vers celles situées dans l'horizon 0-15 cm de profondeur

Au sein de chaque horizon, il y a eu un gradient de concentration des racines fines vers les racines grosses (figure 3). Les racines fines ont été en moyenne de deux à quatre fois plus contaminées que les racines grosses (tableau 3).

Les racines constituent, forcément, la voie d'entrée prépondérante de la molécule dans la canne à sucre. La molécule de CLD semble être absorbée puis rapidement par la plante.

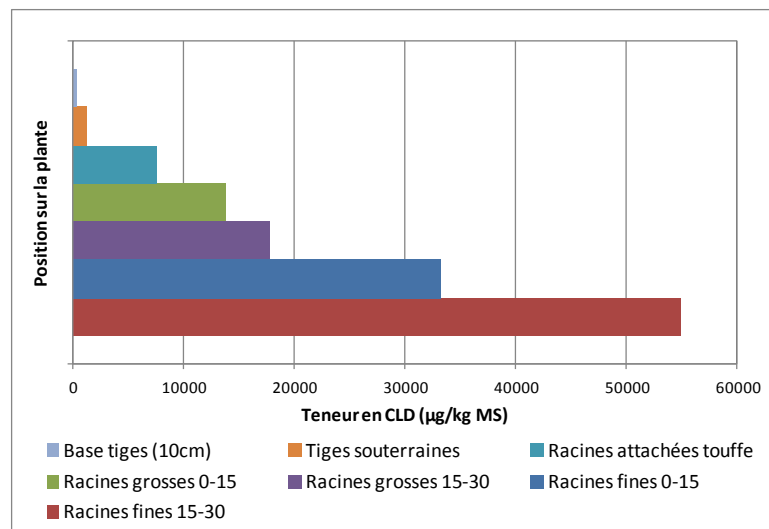


Figure 3: Gradient de concentration de la molécule de chlordécone dans les différentes composantes des parties restant au sol. Moyenne de 3 variétés de cannes (R579, WI86015, WI81456). Essai V4 à 10 mois.

D'après les résultats obtenus, la molécule semble pénétrer préférentiellement dans les racines fines. La molécule de CLD, absorbée par les racines fines, s'y fixe en grande partie ou transite ensuite vers les racines grosses avant d'arriver dans les parties aériennes. Parallèlement, il y a une diminution de teneur en CLD dans les racines, depuis les racines fines de l'horizon le plus profond jusqu'à celles situées à proximité immédiate des tiges (tableau 3), avec une teneur en CLD passant d'environ 50 000µg à environ 7 000µg des racines fines de profondeur aux racines situées à quelques centimètres de la tige (tableau 3). Ce gradient de contamination semble donc lié à la distance parcourue par la molécule depuis son point d'entrée dans la racine. La molécule de CLD se fixe sur des sites à forte affinité, rencontrés dans les racines et les différents compartiments, ce qui entraîne une diminution progressive de la concentration de CLD au cours de son trajet des racines vers les feuilles.

Ainsi, plus on s'éloigne de la source d'absorption, plus les concentrations en CLD sont faibles, et les parties aériennes ont des teneurs en CLD beaucoup plus faibles que celles des racines (tableau 3). De même, la CLD est restée localisée dans les premiers entre-nœuds c'est

à dire sur 80 à 100 centimètres, au-dessus les teneurs sont faibles, proche du seuil de détection et fluctuantes (tableaux 1 et 2).

Le système racinaire paraît donc agir comme un filtre sur la molécule de CLD. Ce rôle semble être lié à la longueur de celui-ci et à sa capacité de fixation. Cette fonction de filtre des racines expliquerait la faible concentration de la molécule dans les parties aériennes de la plante, même dans la partie basse des tiges.

II.2 – Relation entre la teneur en chlordécone du sol et celle de la plante

Comme déjà indiqué, la teneur moyenne en CLD mesurée dans le sol n'a pas été significativement différente d'une parcelle à l'autre sur un même essai (tableau 1). Les échantillons de sol prélevés sur l'essai V4 à 8 mois ont eu des teneurs en CLD plus élevées que celles de l'essai V3, mais cela ne s'est pas répercuté de façon proportionnelle dans les racines et parties aériennes des cannes (tableaux 1a et 1b). Par exemple, la teneur en CLD du sol du traitement « TC8 » de V3 a été la moitié de celle du traitement « WI86015 » de V4 ; et pourtant les teneurs en CLD des tiges souterraines du traitement « WI86015 » a été seulement la moitié de celle du traitement « TC8 » (tableaux 1a et 1b).

Cette absence de proportionnalité entre les teneurs en CLD du sol et de la plante peut s'expliquer à la fois par la variabilité spatiale des teneurs en CLD dans le sol et par l'importance de l'extension du système racinaire de la canne. En effet, le système racinaire absorbe de la CLD dans un volume de sol nettement supérieur à celui situé dans le proche voisinage du pied où les prélèvements ont été réalisés. Il n'est donc pas surprenant de ne pas trouver, dans les résultats obtenus à l'échelle métrique, une relation directe entre la concentration en CLD du sol et celle de la plante. A une échelle différente (are, hectare) cette relation existe (Cabidoche et al., 2011). Dans ces conditions, les différences de concentrations en CLD entre variétés doivent être examinées avec prudence.

Les teneurs en CLD des racines ont été supérieures à celles du sol environnant (tableaux 1 et 3), les deux étant exprimés en matière sèche. Cependant, les racines vivantes ont une humidité de plus de 80 %, alors que l'humidité pondérale du sol est d'environ 20 à 30 % ce qui diminue, in situ, leur concentration au contact du sol humide. En fait, dans le sol, la concentration en CLD du sol humide était donc supérieure à celle des racines, mais avec de faibles écarts. Il ne paraît donc pas y avoir chez la canne à sucre bioconcentration de la CLD.

II.3 – Relation fibres/chlordécone

Les différences de concentrations entre les différentes parties de la plante et entre les variétés peuvent, à priori, s'expliquer par la composition des tissus. D'après certains auteurs (Lesueur-Jannoyer et al, 2011), il semblerait que, plus la teneur en fibres de la plante est grande, plus la CLD est retenue dans les parties basses. Lors de son passage dans le flux de la sève brute, la molécule de CLD semble se fixer sur des tissus fibreux, à forte affinité en créant un gradient de concentration.

En Guadeloupe, il semble y avoir une tendance négative entre la teneur en fibres et la teneur en CLD (figure 4). Ceci peut en partie s'expliquer par le fait que les teneurs moyennes en CLD des racines grosses (15µg/g MS) étaient plus faibles que celles des racines fines (44µg/g MS) malgré une teneur moyenne en fibres un peu plus importante dans les racines grosses que

dans les racines fines (76 % contre 68 %). Sur la figure 4, il existe donc, en fait, deux populations : celle des racines grosses à forte teneur en fibres et « faible » teneur en CLD et celle des racines fines à caractéristiques inversées, sans effet notable des variétés.

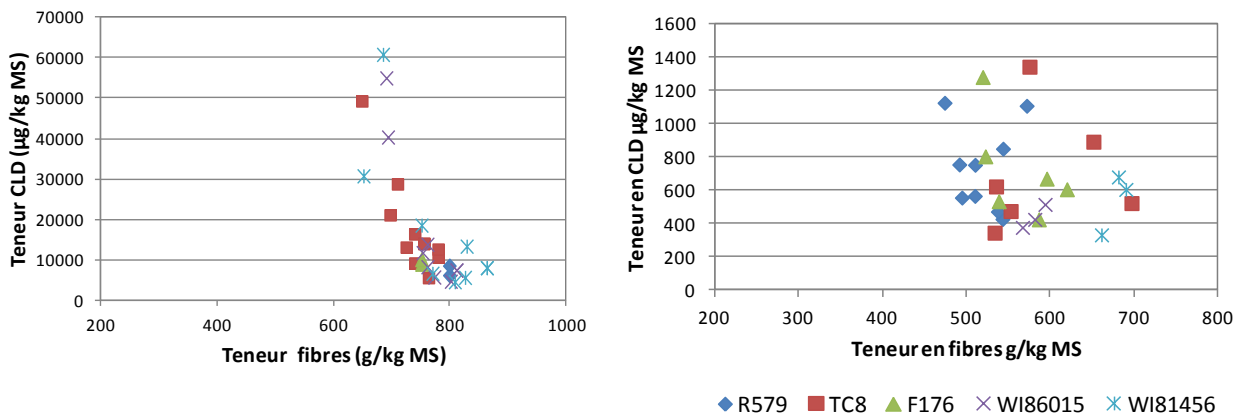


Figure 4 : Relation entre contamination en chlordécone et teneurs en fibre des parties souterraines. A gauche : racines des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8 et 10 mois). 33 données. $R^2 = 0,5$. A droite : tiges souterraines des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8 mois). 27 données. $R^2 = 0,04$.

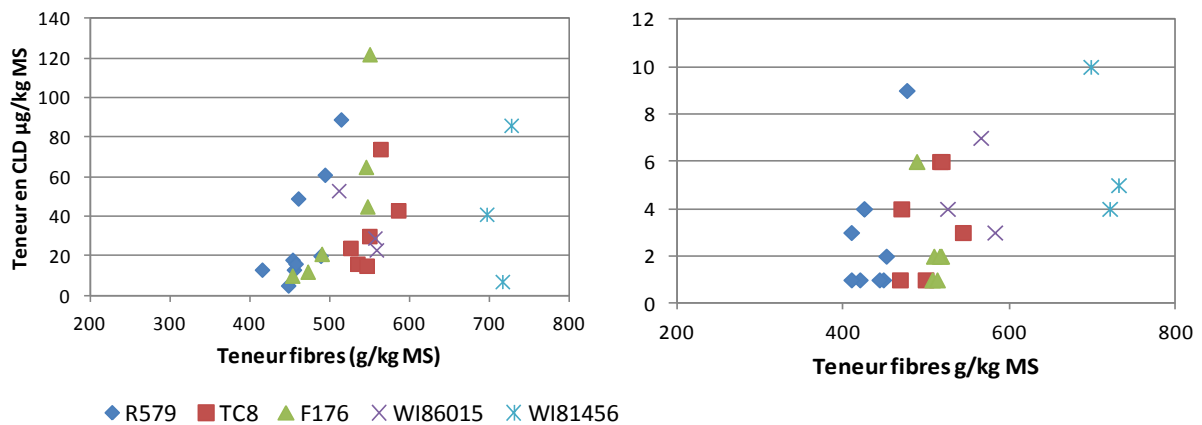


Figure 5 : Relation entre contamination en chlordécone des entrenœuds et teneurs en fibre des entrenœuds. A gauche : entrenœuds 1 à 5, 27 données, $r^2 = 0,128$. A droite : entrenœuds 6 à 10, 27 données, $r^2 = 0,1043$. Données issues des essais V3 (8 et 12 mois) et V4 (8 mois).

En revanche, dans les tiges souterraines ou aériennes, la forte variabilité de teneur en CLD ne s'explique pas par la variabilité de teneurs en fibres (figures 4 et 5).

Concernant les variétés, il ne semble pas y avoir de relation claire entre les teneurs en CLD et en fibres dans les tiges aériennes et souterraines, même pour la variété WI81456 qui a un taux de fibres supérieur sans effet sur la teneur en CLD. De même, la variété R579 la moins fibreuse ne concentre pas moins de CLD que les autres (figure 5). Les teneurs en fibres totales ne permettent donc pas d'expliquer, à elles seules, les gradients de CLD.

II.4 – Evolution des teneurs en chlordécone dans les différentes composantes de la biomasse entre 8 et 12 mois

Sur l'essai V3, à l'âge de 8 mois, la teneur en CLD des racines a été, en moyenne, de 8550 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MS (tableau 1). A l'âge de 12 mois, cette teneur était très légèrement supérieure

avec une concentration moyenne de 10 380 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MS (tableau 2). Si cette augmentation se vérifie elle pourrait s'expliquer par un effet cumulatif dans le temps.

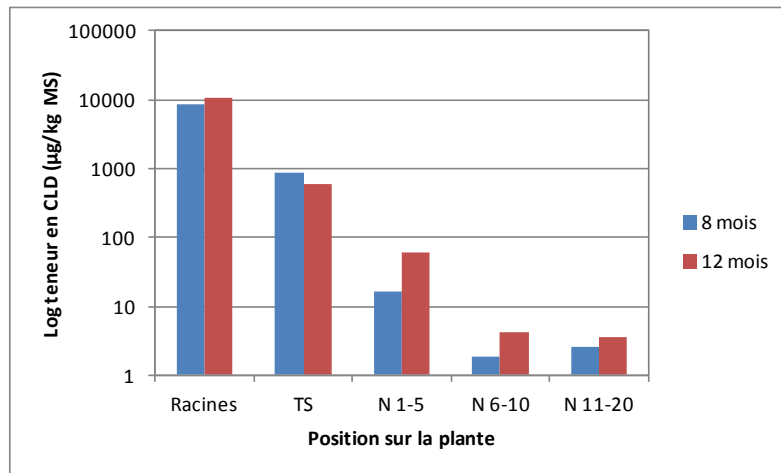


Figure 6: Evolution des concentrations en chlordécone (en $\mu\text{g}/\text{kg}$ de PS, échelle logarithmique) dans les différents compartiments des cannes étudiées entre 8 et 12 mois. Essai V3.

En revanche, entre ces deux dates, il y a eu une diminution de la concentration en CLD de la partie souterraine des tiges des deux variétés testées, compensée par une augmentation de la concentration en CLD dans les premiers entre-nœuds aériens (figure 6). Les faibles valeurs de CLD dans les parties supérieures des tiges rendent les résultats difficiles à analyser.

Il semble donc exister, entre 8 et 12 mois, une certaine modification des teneurs en CLD le long des tiges, la concentration dans les racines restant, elle, plus ou moins constante. Cette modification peut avoir plusieurs origines (accumulation avec le temps, augmentation de la concentration de CLD dans la sève, etc.) des études plus ciblées sur ce point seront nécessaires pour trouver et prouver les causes.

II.5- Estimation des quantités de chlordécone par unité de surface cultivée

La transformation des concentrations de CLD par poids sec en quantités de CLD par unité de surface de culture (figure 7) vise à mieux cerner les risques environnementaux liés à cette molécule. Les valeurs ont été obtenues à partir des concentrations par unité de biomasse et de la biomasse par m^2 . Pour les racines, on a transposé, à 8 mois, des valeurs de biomasse racinaire par unité de surface au sol obtenues à 10 mois sur l'essai V4 (cf I.2.2).

La quantité de CLD localisée dans les racines d'une culture de canne à sucre a été d'environ 25g/ha. Cette quantité de CLD contenue dans les racines était très nettement supérieure à celle des tiges souterraines, qui concentre 1g de CLD par hectare de culture, et encore plus à celle située dans les tiges aériennes (environ 0.036 g/ha).

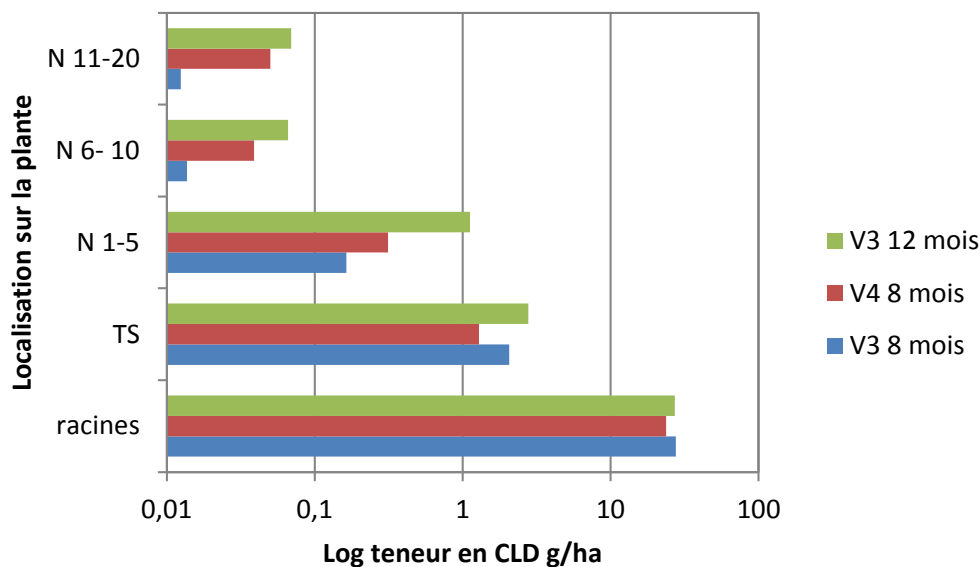


Figure 7 : Essais V3 et V4. Teneurs en chlordécone (en g/ha, échelle logarithmique) dans différentes parties de la plante sur des cannes âgées de 8 mois

Bien que la biomasse des racines soit nettement inférieure à celle des parties aériennes de canne à sucre, elle constitue le compartiment dans lequel est stockée la plus grande quantité de chlordécone. Ainsi, la CLD absorbée par la canne à sucre reste, dans sa plus grande partie, dans le sol.

III – Discussion et conclusion

Une étude assez proche a été menée à la Martinique sur des cannes âgées de 8 mois cultivées en pots. Les résultats (Cabidoche et al, 2012) font état de teneurs plus élevées qu'en Guadeloupe avec des valeurs d'environ 5000 µg/kg dans les premiers entrenœuds. Ces différences peuvent s'expliquer par les conditions expérimentales en particulier le fait qu'à la Martinique l'étude a été faite en pots et en Guadeloupe en conditions de plein champ. Néanmoins, dans les deux cas, il existe un gradient de concentration important depuis les racines jusqu'à l'extrémité supérieure des tiges. En tenant compte de ces différences de conditions expérimentales, les résultats du programme REBECCA sont donc à la fois concordants et complémentaires avec ceux obtenus à la Martinique.

En Guadeloupe (programme REBECCA) comme à la Martinique (Cabidoche et al., 2012), les résultats les plus innovants concernent la concentration de CLD dans la partie souterraine des tiges et les racines. En effet, de par leur longueur, elles jouent à priori un rôle de filtre de CLD ; mais les racines restant dans le sol, la CLD racinaire n'est pas exportée. Les parties aériennes les plus contaminées, c'est-à-dire les dix premiers centimètres des tiges aériennes, restent elles aussi sur la parcelle, puisqu'elles sont situées sous le niveau de la coupe.

Les parties sommitales des tiges et feuilles adhérentes (vertes et sèches) sont aussi considérées, actuellement, comme de la biomasse combustible. Partant des résultats obtenus sur la répartition de la CLD sur l'axe de la tige, la teneur moyenne en CLD des feuilles peut être estimée comme étant relativement faible. Jannoyer et al. (2011) citent des teneurs en CLD inférieures à 1µg/kg de matière fraîche dans les feuilles vertes, soit approximativement,

3µg/kg de matière sèche en considérant une teneur moyenne en matière sèche des feuilles vertes de 30% (Chopart, 2012). Cette teneur est cent fois plus faible que celle mesurée dans les dix premiers centimètres des tiges aériennes (332 µg/kg MS). En Guadeloupe, au vu de ces premiers résultats obtenus à la Martinique et pour des raisons budgétaires, aucune analyse de CLD n'a été effectuée sur les feuilles.

D'un point de vue pratique, les composantes les plus contaminées par la CLD n'étant pas exportées, les quantités de CLD brûlées lors de la combustion seront donc relativement faibles, ce qui limitera l'impact environnemental de cette filière.

D'un point de vue plus scientifique et générique, les résultats concernant les racines de cinq variétés de cannes en première année de plantation, ouvrent la voie à une compréhension et à une modélisation du transfert de la CLD dans le système sol-eau-plante. Ils doivent toutefois être confirmés en repousse.

Bibliographie

Cabidoche Y.M., Achard R., Cattan P., Clermont-Daupin C., Massat F., Sansoulet J. (2009). Long-term pollution by chlordécone of tropical volcanic soils in the French West Indies : a simple leaching model accounts for current residues. *Environmental Pollution*, 157, 1697-1705.

Cabidoche Y.M., Laurent F., Lesueur-Jannoyer M. (2012). Les déterminants de la contamination des plantes par la chlordécone (WP PLANT). 15 pages. In : Pollution des sols et des eaux par la chlordécone aux Antilles, conséquences sur la contamination des cultures et des organismes dulçaquicoles. Compte rendu de fin de projet ANR Chlordexco.

Cabidoche Y.M, Lesueur Jannoyer M. 2011. Pollution durable des sols par la chlordécone aux Antilles : comment la gérer ? *Innovations Agronomiques* 16 (2011), 117-133.

Chopart J.L. 1999. Relations entre état physique du sol, systèmes racinaires et fonctionnement hydrique du peuplement végétal : outils d'analyse *in situ* et exemples d'études en milieu tropical à risque climatique élevé. France. Thèse Univ. J. Fourier Grenoble, 350 p.

Chopart JL 2004. Les systèmes racinaires des cultures tropicales : rôle, méthodes d'étude *in situ*, développement, fonctionnement. Document de synthèse note Cirad 43p.

Chopart JL, 2012. Résultats du programme REBECCA phase de septembre 2011 à mars 2012. Volet agro-variétal. CIRAD Guadeloupe, note scientifique REBECCA n° 6. 32p.

Lesueur-Jannoyer M., Carles C., Michel S., 2011. Contamination de la canne à sucre et des sous produits par la chlordécone. Note PRAM, CIRAD Martinique, 15 p.