

Impact des modes de préparation des aliments sur l'exposition des consommateurs à la chlordécone

*Volet recherche du projet Jafa
Action 21 du Plan National d'Action Chlordécone*



F. CLOSTRE
M. LESUEUR JANNOYER
B. TURPIN

Rapport final mars 2011

Remerciements :

Nous remercions toutes les personnes qui ont permis la réalisation de ce travail, en particulier :

- les exploitants agricoles qui se sont investis dans la mise en place et le suivi des essais au champ ;
- la Chambre d'Agriculture de la Martinique qui nous a permis d'identifier de manière pertinente les parcelles d'expérimentation et nous a fourni les plants d'igname ;
- les techniciens du Cirad PRAM pour leurs conseils sur la conduite et le suivi des cultures ;
- les Laboratoires Départementaux d'Analyses de la Drôme et de la Martinique pour leurs efforts d'adaptation aux contraintes de cette étude.

Résumé

Ce projet correspond au volet recherche de l'action 21 (Jardins FAMILIAUX) du Plan National d'Action Chlordécone piloté par l'ARS en Martinique. L'objectif est de déterminer l'influence du mode de préparation des aliments sensibles au transfert de chlordécone du sol vers la plante afin de prodiguer des conseils aux ménages possédant un jardin sur des sols pollués et consommant régulièrement ces produits.

Cinq cultures ont été retenues dans notre expérimentation : concombre, giraumon, dachine, patate douce et igname. Le transfert est étudié sur deux types de sol (andosol et ferrisol-nitisol) présentant des niveaux de contamination moyens à élevés. Deux modes de préparation sont testés : l'épluchage (3 à 5 mm) et la cuisson.

Les cultures ont été conduites chez des agriculteurs pour se rapprocher au maximum des conditions de production dans les jardins familiaux. Une expérimentation sous serre complète ce dispositif afin de sécuriser certains résultats en palliant aux aléas climatiques pouvant être rencontrés au champ.

L'analyse des teneurs en chlordécone des échantillons végétaux (fruit ou tubercule entier, peau, pulpe crue voire cuite) et des prélèvements de sol correspondants nous a permis d'approfondir la connaissance des transferts de chlordécone du sol vers la plante ainsi que l'impact de l'épluchage et de la cuisson sur l'exposition du consommateur.

L'existence d'une proportionnalité, d'une part, entre les concentrations en chlordécone des différents compartiments et, d'autre part, entre la teneur du sol et la teneur dans les compartiments est confirmée.

Concernant les cucurbitacées, dans le cas du concombre, le mode de préparation ne semble pas modifier significativement l'exposition potentielle du consommateur. En revanche, dans le cas du giraumon la pulpe est significativement moins contaminée que la peau (de l'ordre de quatre fois moins).

L'étude de la relation entre la teneur du sol en chlordécone et la concentration dans le fruit entier, révèle un transfert maximum de l'ordre de 1% pour le concombre et de 3% pour le giraumon. Ce qui permet de cultiver, sans risque de non-conformité, ces productions sur des sols dont les teneurs en chlordécone vont jusqu'à 2 mg/kg et 0.7 mg/kg de sol sec.

Pour les racines et tubercules, l'existence d'un transfert privilégié vers la peau par rapport à la pulpe est également confirmée. En effet, la concentration en chlordécone est nettement plus importante dans la peau que dans la pulpe. Le transfert maximum du sol vers les tubercules entiers est de 3-4% sur andosol pour l'igname et la patate douce mais de 20% pour le dachine sur ferrisol-nitisol. Vers la pulpe, il est de 0.5% pour l'igname sur andosol mais de 20% pour le dachine sur ferrisol-nitisol. Sur andosol, il est donc possible de cultiver des patates douces et des ignames jusqu'à une teneur du sol en chlordécone de 0.6 mg/kg de SS sans risque d'obtenir une production non conforme. Sur ferrisol-nitisol, ces valeurs sont de 0.18 mg/kg pour l'igname et 0.3 mg/kg pour la patate douce. Dans le cadre d'une autoconsommation, le risque étant lié à la teneur de la pulpe, les valeurs des limites de sol peuvent être réévaluées à la hausse (jusqu'à 3.8 mg/kg sur andosol pour l'igname). En revanche, sur ferrisol-nitisol, la culture du dachine est déconseillée au-delà d'une teneur en chlordécone de 0.1 mg/kg de SS. Ces transferts devront être validés pour des teneurs du sol en chlordécone faibles (0.1 à 1 mg/kg de SS).

Ces données permettront d'abonder l'outil d'aide à la décision pour les cultivateurs, tant professionnels qu'amateurs, indiquant ces teneurs maxima du sol pour différentes cultures.

La cuisson, quant à elle, n'a pas d'effet sur la teneur en chlordécone, elle ne permet donc pas de diminuer l'exposition du consommateur. Afin de préserver au mieux les qualités nutritionnelles des produits, il est inutile de « sur-cuire » les aliments.

Le lavage soigneux et l'épluchage (y compris pour la patate douce souvent consommée pelée après cuisson) sont des pratiques à conseiller en raison du risque de contamination par la terre résiduelle et du risque de concentration plus forte dans la peau. Ces recommandations s'adressent en particulier aux foyers cultivant un jardin contaminé ou s'approvisionnant via des circuits sans contrôle de l'origine des produits (circuits informels).

SOMMAIRE

RESUME.....	3
CHAPITRE 1 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	11
1 CONTEXTE ET OBJECTIFS 11	
1.1 <i>Rappel du contexte</i>	<i>11</i>
1.2 <i>Objectifs du projet</i>	<i>11</i>
1.3 <i>Méthode</i>	<i>12</i>
2 MISE EN PLACE DES EXPERIMENTATIONS 13	
2.1 <i>Choix des parcelles.....</i>	<i>13</i>
2.2 <i>Mise en place des essais</i>	<i>15</i>
2.3 <i>Sécuriser les résultats : expérimentations en milieu contrôlé.....</i>	<i>23</i>
3 SUIVI DES EXPERIMENTATIONS 24	
3.1 <i>Suivi régulier des parcelles expérimentales</i>	<i>24</i>
3.2 <i>Suivi individuel des plants</i>	<i>24</i>
4 PROTOCOLE DE RECOLTE 25	
4.1 <i>Prélèvement de l'organe.....</i>	<i>25</i>
4.2 <i>Prélèvement de sol.....</i>	<i>25</i>
4.3 <i>La récolte</i>	<i>27</i>
5 PREPARATION ET SUIVI DES ECHANTILLONS 27	
5.1 <i>Préparation des échantillons</i>	<i>27</i>
5.2 <i>Suivi des échantillons.....</i>	<i>29</i>
CHAPITRE 2 : RESULTATS	30
1 AVANCEMENT DE L'ETUDE 30	
1.1 <i>Avancement dans la réalisation.....</i>	<i>30</i>
1.2 <i>Traitement des résultats.....</i>	<i>32</i>
2 RESULTATS POUR LE CONCOMBRE 33	
2.1 <i>Ventilations des teneurs et taux de conformité.....</i>	<i>33</i>
2.2 <i>Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au fruit entier</i>	<i>41</i>
2.3 <i>Transferts sol-plante</i>	<i>55</i>
2.4 <i>Résultats complémentaires « hors Jafa »</i>	<i>67</i>
2.5 <i>Préconisations envisagées</i>	<i>68</i>
3 RESULTATS POUR LE GIRAUMON 68	
3.1 <i>Ventilations des teneurs et taux de conformité.....</i>	<i>68</i>
3.2 <i>Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au fruit entier</i>	<i>74</i>
3.3 <i>Transferts sol-plante</i>	<i>82</i>
3.4 <i>Résultats complémentaires « hors Jafa »</i>	<i>86</i>
3.5 <i>Préconisations envisagées</i>	<i>86</i>
4 RESULTATS POUR LA PATATE DOUCE 87	
4.1 <i>Ventilations des teneurs et taux de conformité.....</i>	<i>87</i>
4.2 <i>Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au tubercule entier et au sol</i>	<i>96</i>
4.3 <i>Transferts sol-plante</i>	<i>101</i>
4.4 <i>Préconisations envisagées</i>	<i>107</i>
5 RESULTATS POUR LE DACHINE 108	
5.1 <i>Ventilations des teneurs et taux de conformité.....</i>	<i>108</i>
5.2 <i>Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au tubercule entier et au sol</i>	<i>112</i>
5.3 <i>Transferts sol-plante</i>	<i>114</i>
5.4 <i>Préconisations envisagées</i>	<i>120</i>
6 RESULTATS POUR L'IGNAME 120	
6.1 <i>Ventilations des teneurs et taux de conformité.....</i>	<i>121</i>
6.2 <i>Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au tubercule entier et au sol</i>	<i>128</i>
6.3 <i>Transferts sol-plante</i>	<i>134</i>
6.4 <i>Préconisations envisagées</i>	<i>140</i>

7	BILAN ET PERSPECTIVES	140
7.1	<i>Résultats généraux</i>	140
7.2	<i>Perspectives</i>	143
7.3	<i>Partenariat avec l'association SEVE</i>	144
7.4	<i>Etudes sur les mécanismes du transfert</i>	145

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : PLANT DE PATATE DOUCE	15
FIGURE 2 : PLANT DE DACHINE	15
FIGURE 3 : PLANT D'IGNAME	15
FIGURE 4 : SCHEMA D'IMPLANTATION D'UNE PARCELLE EXPERIMENTALE TYPE.....	17
FIGURE 5 : PARCELLE EXPERIMENTALE « ANDO_1 »	18
FIGURE 6 : PARCELLE EXPERIMENTALE « ANDO_2 »	19
FIGURE 7 : PARCELLE EXPERIMENTALE « ANDO_3 »	20
FIGURE 8 : PARCELLE EXPERIMENTALE « FERRI ».....	21
FIGURE 9 : PARCELLE EXPERIMENTALE « NITI ».....	22
FIGURE 10 : DISPOSITIF DE L'ESSAI SOUS SERRE.....	23
FIGURE 11 : POINTS DE PRELEVEMENT DE SOL POUR CHAQUE PLANT ANALYSE (CROIX ROUGE)	26
FIGURE 12 : POINTS DE PRELEVEMENT POUR LE GIRAUMON (CROIX ROUGE).....	27
FIGURE 13 : DIAGRAMME DE GANTT DE LA PLANIFICATION DES TACHES DU VOLET RECHERCHE DU PROGRAMME JAJA	31
FIGURE 14 : CONCOMBRE - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$)	36
FIGURE 15 : CONCOMBRE - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$)	37
FIGURE 16 : CONCOMBRE - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR FERRISOL-NITISOL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$)	38
FIGURE 17 : LECTURE GRAPHIQUE DE LA LMR.....	41
FIGURE 18 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL.....	42
FIGURE 19 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL (CORRECTION DE LA VALEUR INCONSISTANTE)	43
FIGURE 20 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL AU CHAMP.....	44
FIGURE 21 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL SOUS SERRE	45
FIGURE 22 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL SOUS SERRE ET AU CHAMP	46
FIGURE 23 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR NITISOL-FERRISOL	47
FIGURE 24 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR NITISOL-FERRISOL AU CHAMP	48
FIGURE 25 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR NITISOL SOUS SERRE	49
FIGURE 26 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR NITISOL-FERRISOL AU CHAMP ET SOUS SERRE	50
FIGURE 27 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL ET NITISOL-FERRISOL	51
FIGURE 28 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] TOUS TYPES DE SOL ET DISPOSITIFS CONFONDUS.....	52
FIGURE 29 : CONCOMBRE - CONCENTRATION DANS PU PAR RAPPORT A CONCENTRATION DANS PE SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL...	53
FIGURE 30 : LECTURE GRAPHIQUE DU RISQUE.....	56
FIGURE 31 : CONCOMBRE - [Fe]/[SOL] SUR ANDOSOL	57
FIGURE 32 : CONCOMBRE - [Pe]/[SOL] SUR ANDOSOL	58
FIGURE 33 : CONCOMBRE - [Pu]/[SOL] SUR ANDOSOL.....	58
FIGURE 34 : CONCOMBRE - TRANSFERTS MAXIMA DE [Fe]/[SOL], [Pe]/[SOL] ET [Pu]/[SOL] SUR ANDOSOL.....	59
FIGURE 35 : CONCOMBRE - [Fe]/[SOL] SUR ANDOSOL AU CHAMP ET SOUS SERRE.....	60
FIGURE 36 : CONCOMBRE - [Fe]/[SOL] SUR NITISOL-FERRISOL.....	61
FIGURE 37 : CONCOMBRE - [Pe]/[SOL] SUR NITISOL-FERRISOL	62
FIGURE 38 : CONCOMBRE - [Pu]/[SOL] SUR NITISOL-FERRISOL	62
FIGURE 39 : CONCOMBRE - TRANSFERTS MAXIMA DE [Fe]/[SOL], [Pe]/[SOL] ET [Pu]/[SOL] SUR NITISOL-FERRISOL	63
FIGURE 40 : CONCOMBRE - [Fe]/[SOL] SUR NITISOL-FERRISOL AU CHAMP ET SOUS SERRE	64
FIGURE 41 : CONCOMBRE - [Fe]/[SOL] TOUS SOLS.....	65
FIGURE 42 : DETERMINATION GRAPHIQUE DE LA CONCENTRATION MAXIMALE DU SOL POUR LAQUELLE 100% DE CONFORMITE DU FRUIT	66
FIGURE 43 : CONCOMBRE - DETERMINATION GRAPHIQUE DES CONCENTRATIONS MAXIMALES SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL.....	67
FIGURE 44 : GIRAUMON - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$)	71
FIGURE 45 : GIRAUMON - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$)	72
FIGURE 46 : GIRAUMON - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR NITISOL ET FERRISOL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$)	73

FIGURE 47 : GIRAUMON - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL	75
FIGURE 48 : GIRAUMON - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR FERRISOL ET NITISOL	76
FIGURE 49 : GIRAUMON - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL ET NITISOL-FERRISOL	77
FIGURE 50 : GIRAUMON - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] TOUS TYPES DE SOL CONFONDUS.....	78
FIGURE 51 : GIRAUMON - CONCENTRATION DANS PU PAR RAPPORT A [PE] SUR ANDOSOL ET NITISOL-FERRISOL	78
FIGURE 52 : GIRAUMON - CONCENTRATION DANS PU ET PUC PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL	79
FIGURE 53 : GIRAUMON - CONCENTRATION DANS PU ET PUC PAR RAPPORT A [Fe] SUR FERRISOL ET NITISOL	80
FIGURE 54 : GIRAUMON - CONCENTRATION DANS PU ET PUC PAR RAPPORT A [Fe] TOUS SOLS CONFONDUS	81
FIGURE 55 : PLANT DE GIRAUMON ET PRELEVEMENTS DE SOL	82
FIGURE 56 : GIRAUMON - [Fe]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL.....	83
FIGURE 57 : GIRAUMON - [PE]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL	84
FIGURE 58 : GIRAUMON - [PU]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL	84
FIGURE 59 : GIRAUMON – TRANSFERT MAXIMA DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS SUR ANDOSOL	85
FIGURE 60 : PATATE DOUCE – SCHEMA D’ADSORPTION ET DE DIFFUSION DE LA MOLECULE DE CHLORDECONE	90
FIGURE 61 : PATATE DOUCE - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT (µG/KG MF)	91
FIGURE 62 : PATATE DOUCE - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL (µG/KG MF)	92
FIGURE 63 : PATATE DOUCE - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR NITISOL ET FERRISOL (µG/KG MF)	93
FIGURE 64 : PATATE DOUCE - GRAPHIQUE DES TAUX DE CONFORMITE EN FONCTION DE LA TENEUR DU SOL EN CHLORDECONE	94
FIGURE 65 : PATATE DOUCE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL	96
FIGURE 66 : PATATE DOUCE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR FERRISOL ET NITISOL	97
FIGURE 67 : PATATE DOUCE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL ET NITISOL-FERRISOL	98
FIGURE 68 : PATATE DOUCE - CONCENTRATION DANS PU ET PUC PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL.....	99
FIGURE 69 : PATATE DOUCE - CONCENTRATION DANS PU ET PUC PAR RAPPORT A [Fe] SUR FERRISOL ET NITISOL.....	100
FIGURE 70 : PATATE DOUCE - [Fe]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL.....	102
FIGURE 71 : PATATE DOUCE - [PE]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL	103
FIGURE 72 : PATATE DOUCE - [PU]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL	104
FIGURE 73 : PATATE DOUCE – TRANSFERTS MAXIMA DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS SUR ANDOSOL	105
FIGURE 74 : PATATE DOUCE – TRANSFERTS MAXIMA DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS SUR FERRISOL-NITISOL.....	106
FIGURE 75 : DACHINE - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL (µG/KG MF)	111
FIGURE 76 : DACHINE - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL	112
FIGURE 77 : DACHINE - CONCENTRATION DANS PU ET PUC PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL.....	113
FIGURE 78 : DACHINE - [Fe]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL.....	115
FIGURE 79 : DACHINE - [PE]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL.....	116
FIGURE 80 : DACHINE - [PU]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL	117
FIGURE 81 : DACHINE– TRANSFERTS MAXIMA DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS SUR ANDOSOL	118
FIGURE 82 : DACHINE – TRANSFERTS MAXIMA DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS SUR FERRISOL-NITISOL.....	119
FIGURE 83 : IGNAME - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT (µG/KG MF)	124
FIGURE 84 : IGNAME - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL (µG/KG MF)	125
FIGURE 85 : IGNAME - GRAPHIQUE DES REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR NITISOL ET FERRISOL (µG/KG MF)	126
FIGURE 86 : IGNAME - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL.....	129
FIGURE 87 : IGNAME - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR FERRISOL ET NITISOL.....	130
FIGURE 88 : IGNAME - CONCENTRATION DANS PE ET PU PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL ET NITISOL-FERRISOL.....	131
FIGURE 89 : IGNAME - CONCENTRATION DANS PU ET PUC PAR RAPPORT A [Fe] SUR ANDOSOL.....	132
FIGURE 90 : IGNAME - CONCENTRATION DANS PU ET PUC PAR RAPPORT A [Fe] SUR FERRISOL ET NITISOL.....	133
FIGURE 91 : IGNAME - [Fe]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL	135
FIGURE 92 : IGNAME - [PE]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL.....	136
FIGURE 93 : IGNAME - [PU]/[SOL] SUR ANDOSOL ET FERRISOL-NITISOL	137
FIGURE 94 : IGNAME – TRANSFERTS MAXIMA DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS SUR ANDOSOL.....	138
FIGURE 95 : IGNAME – TRANSFERTS MAXIMA DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS SUR FERRISOL-NITISOL.....	139

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : INTERVALLES DES VALEURS DE POLLUTION DES SOLS POUR LES DEUX NIVEAUX CHOISIS	14
TABLEAU 2 : LISTE FINALE DES AGRICULTEURS PARTENAIRES	14
TABLEAU 3 : NOMBRE D'ÉCHANTILLONS RECOLTES ET EXPÉDIÉS - CHAQUE MODALITÉ (Fe, Pu, Pe et Puc) CORRESPOND À UN ÉCHANTILLON	29
TABLEAU 4 : CONCOMBRE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DU SOL PAR TYPE ET PAR PARCELLE (MG/KG DE SOL SEC)	33
TABLEAU 5 : CONCOMBRE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR PARCELLE (µG/KG MF)	34
TABLEAU 6 : CONCOMBRE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR TYPE DE SOL ET COMPARTIMENT (µG/KG MF)	35
TABLEAU 7 : CONCOMBRE - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT (µG/KG MF)	36
TABLEAU 8 : CONCOMBRE - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL (µG/KG MF).....	37
TABLEAU 9 : CONCOMBRE - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT SUR FERRISOL-NITISOL (µG/KG MF)	38
TABLEAU 10: CONCOMBRE - TAUX DE CONFORMITÉ DU FRUIT ENTIER ET DE LA PULPE PAR TYPE DE SOL ET COMPARTIMENT	39
TABLEAU 11 : CONCOMBRE - TAUX DE CONFORMITÉ DU FRUIT ENTIER ET DE LA PULPE PAR TYPE DE SOL, MODE DE CULTURE ET COMPARTIMENT	40
TABLEAU 12: CONCOMBRE - ÉQUATIONS ET COEFFICIENTS DE DÉTERMINATION (R ²) ET DE CORRELATION (R) DES COURBES DE TENDANCES POUR [Pe]/[Fe] ET [Pu]/[Fe] SELON LES DIFFÉRENTES MODALITÉS ÉTUDIÉES	54
TABLEAU 13 : GIRAUMON - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS DE SOL PAR TYPE DE SOL (MG/KG SS).....	68
TABLEAU 14: GIRAUMON - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR PARCELLE (µG/KG MF)	69
TABLEAU 15 : GIRAUMON - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR COMPARTIMENT VÉGÉTAL (µG/KG MF).....	70
TABLEAU 16 : GIRAUMON - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT (µG/KG MF)	71
TABLEAU 17 : GIRAUMON - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL (µG/KG MF).....	72
TABLEAU 18 : GIRAUMON - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT SUR NITISOL ET FERRISOL (µG/KG MF).....	73
TABLEAU 19 : GIRAUMON - TAUX DE CONFORMITÉ PAR TYPE DE SOL	74
TABLEAU 20 : GIRAUMON - TAUX DE CONFORMITÉ PAR COMPARTIMENT	74
TABLEAU 21 : PATATE DOUCE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS DE SOL PAR TYPE DE SOL (MG/KG SS)	87
TABLEAU 22: PATATE DOUCE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR PARCELLE (µG/KG MF)	88
TABLEAU 23 : PATATE DOUCE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR COMPARTIMENT VÉGÉTAL (µG/KG MF)	89
TABLEAU 24 : PATATE DOUCE - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT (µG/KG MF)	91
TABLEAU 25 : PATATE DOUCE - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL (µG/KG MF).....	92
TABLEAU 26 : PATATE DOUCE - RÉPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR COMPARTIMENT SUR NITISOL ET FERRISOL (µG/KG MF).....	93
TABLEAU 27 : PATATE DOUCE - TAUX DE CONFORMITÉ PAR TYPE DE SOL.....	94
TABLEAU 28 : PATATE DOUCE - CONCENTRATION EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX SUR LA PARCELLE ANDO3 (µG/KG DE MF)	95
TABLEAU 29 : PATATE DOUCE - TAUX DE CONFORMITÉ PAR COMPARTIMENT.....	95
TABLEAU 30 : PATATE DOUCE – ÉQUATION DES DROITES DE TRANSFERTS MOYEN ET MAXIMUM PAR TYPE DE SOL ET COMPARTIMENT....	106
TABLEAU 31 : DACHINE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS DE SOL PAR TYPE DE SOL (MG/KG SS)	108
TABLEAU 32: DACHINE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ÉCHANTILLONS VÉGÉTAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR PARCELLE (µG/KG MF)	109

TABLEAU 33 : DACHINE - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR COMPARTIMENT VEGETAL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$).....	110
TABLEAU 34 : DACHINE - REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$).....	111
TABLEAU 35 : IGNAMÉ - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS DE SOL PAR TYPE DE SOL (MG/KG SS)	121
TABLEAU 36: IGNAMÉ - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR PARCELLE ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$)	122
TABLEAU 37 : IGNAMÉ - CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR TYPE DE SOL ET PAR COMPARTIMENT VEGETAL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$).....	123
TABLEAU 38 : IGNAMÉ - REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$)	124
TABLEAU 39 : IGNAMÉ - REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR ANDOSOL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$).....	125
TABLEAU 40 : IGNAMÉ - REPARTITIONS DES CONCENTRATIONS EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX PAR COMPARTIMENT SUR NITISOL ET FERRISOL ($\mu\text{G}/\text{KG MF}$).....	126
TABLEAU 41 : IGNAMÉ - TAUX DE CONFORMITÉ PAR TYPE DE SOL.....	127
TABLEAU 42 : IGNAMÉ - CONCENTRATION EN CHLORDECONE DES ECHANTILLONS VEGETAUX SUR LA PARCELLE ANDO3 ($\mu\text{G}/\text{KG DE MF}$) .	127
TABLEAU 43 : IGNAMÉ - TAUX DE CONFORMITÉ PAR COMPARTIMENT	128
TABLEAU 44 : TABLEAU RECAPITULATIF DES TAUX DE TRANSFERTS MAXIMA.....	141
TABLEAU 45 : TABLEAU RECAPITULATIF DES TAUX DES TENEURS LIMITES DES SOLS POUR LA MISE EN CULTURE (MG/KG DE SS)	141

Chapitre 1 : Dispositif expérimental

1 Contexte et objectifs

1.1 Rappel du contexte

La chlordécone est un insecticide qui a été largement utilisé contre le charançon du bananier entre 1972 et 1993 sous le nom commercial de Képone (1972-82) puis Curlone (1982-93), aux Antilles notamment. Du fait de son utilisation quasi-systématique, cette matière active pollue aujourd'hui une proportion importante des terres arables en Martinique. S'il est possible de contrôler la qualité sanitaire des productions issues des circuits agricoles classiques déclarés, une attention particulière doit être donnée aux jardins familiaux ainsi qu'aux circuits de distribution « courts » et/ou informels. Pour une part de la population martiniquaise, la consommation de légumes issus de jardins contaminés par la chlordécone est fréquente, et peut aboutir à une exposition chronique à la chlordécone supérieure aux doses journalières admissibles¹.

Pour limiter les risques d'exposition, la Direction de la Santé et du Développement Social (DSDS) a structuré le programme Jafa (Jardins Familiaux), intégré au Plan National d'Action Chlordécone 2008-2010 et correspondant à l'action 21. L'élaboration de messages d'information adaptés, quant aux risques et aux précautions de consommation, nécessite un volet « recherche » concernant l'étude de l'impact des modes de préparation de produits sensibles (racines, tubercules et cucurbitacées) sur le niveau de contamination des parties consommées.

Aussi, la DSDS a fait appel au Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad) pour caractériser l'influence des modes de préparation, tel que l'épluchage et la cuisson sur le niveau de contamination par la chlordécone des légumes issus de jardins familiaux. Le Cirad s'engage ainsi à caractériser les contaminations des peaux, pulpes et pulpes cuites de légumes et légumes-racines choisis pour leurs caractéristiques (3 types de cycles de production, forte contamination potentielle) et leur forte fréquence de mise en culture et donc de consommation. L'expérimentation est conduite en partenariat avec des agriculteurs volontaires, dont les zones de culture ont été préalablement ciblées et correspondent à la situation des jardins familiaux des foyers les plus exposés¹.

Ce rapport intermédiaire traite de l'avancement actuel de cette étude : moyens humains, matériels et logistiques mis en œuvre (choix, problèmes et biais à considérer, etc.) et présente les résultats disponibles.

1.2 Objectifs du projet

L'objectif général de ce projet, est de **caractériser l'impact des modes de préparation de certains légumes considérés comme « à risque » sur leur niveau de**

¹ Cf. études « RESO », « CALBAS » et « ESCAL » coordonnées par la CIRE-AG

contamination et l'exposition des consommateurs. Les légumes concernés sont ceux visés par le programme JAJA et la convention signée par la DSDS et le Cirad².

L'objectif finalisé est de pouvoir **conseiller les consommateurs** sur les cultures possibles dans leur jardin, les précautions à prendre en termes de fréquence et de mode de consommation ainsi que les pratiques à privilégier ou à proscrire pour les productions ciblées. Par ailleurs, les résultats de ces études alimenteront la connaissance générale des transferts sol-plante de chlordécone. Les facteurs testés dans la contamination des productions sont le type de sol, le niveau de pollution du sol et les modes de préparation des produits récoltés (épluchage, cuisson) avant consommation.

1.3 Méthode

La démarche retenue par le Cirad est une démarche expérimentale en partenariat avec les producteurs des zones polluées. L'expérimentation en jardin familial n'a pas été retenue du fait de la très petite surface de certains jardins et donc de la difficulté de conduire toutes les cultures sur le même site (immobilisation de la totalité de la surface cultivable).

1.3.1 Mise en place et suivi des cultures

La conduite des parcelles expérimentales est réalisée par des agriculteurs volontaires travaillant sous convention, en partenariat avec le Cirad, pour la mise en place et le suivi des cultures jusqu'à la récolte. Ces agriculteurs ont été sélectionnés d'après les types de sol, les niveaux de pollution et les cultures possibles sur leurs parcelles.

1.3.2 Influence des modes de consommation sur la teneur en chlordécone

Parmi les cultures classées « à risques » et « suspectes³ » pour le transfert de chlordécone, **5 productions ont été retenues** en fonction de la durée du cycle agronomique (court, intermédiaire et long) et selon la fréquence de mise en culture et de consommation en Martinique. Trois légumes-racines, la **patate douce**, le **dachine** et l'**igname**, et 2 cucurbitacées, le **concombre** et le **giraumon**, seront ainsi étudiés.

Les modes de préparation à l'étude sont l'**épluchage** d'une part et la **cuisson** d'autre part. Selon les modalités habituelles de consommation des légumes, les analyses des échantillons de fruits entiers (Fe) sont couplées à des analyses de pulpes (Pu), pulpes cuites (PuC), peaux (Pe) et du sol à proximité du plant échantillonné pour évaluer l'effet des pratiques de préparation (épluchage et/ou cuisson) sur le niveau de contamination de l'organe et ainsi pouvoir prodiguer des recommandations d'une part et d'autre part, pour étudier le transfert de chlordécone du sol vers l'organe récolté.

Pour le concombre, rarement cuit mais souvent épluché, sont analysés les compartiments Fe, Pe et Pu, pour le giraumon, l'igname et le dachine, systématiquement consommés cuits et épluchés, nous analysons Fe, Pe, Pu et PuC. Enfin, pour la patate douce, consommée cuite, parfois épluchée, parfois pelée, le choix a été fait de s'intéresser à l'impact de l'épluchage sur la teneur en chlordécone, les analyses portent donc sur Fe, Pu, PuC et Pe.

² Cf. Annexe 1 : Convention de collaboration DSDS - Cirad

³ Cf. Annexe 2 : Etude sur la dynamique du chlordécone en fonction de la culture et de la durée du cycle.

2 Mise en place des expérimentations

2.1 Choix des parcelles

2.1.1 Deux types de sols au comportement très différent

Deux types de sols représentatifs des zones contaminées par la chlordécone⁴ (zones cultivées en bananeraies en 1972-93) ont été retenus pour leurs comportements spécifiques vis-à-vis de cette molécule.

Les **andosols**, représentés majoritairement sur la partie Nord de la Martinique⁴, sont des sols jeunes et peu évolués issus de l'altération de roches volcaniques. De texture sablo-argileuse, ce sont des sols très filtrants. Du fait de la nature et de la forte proportion de leurs argiles, appelées allophanes, dont la structure spécifique leur confère des propriétés de piégeages particulières (Woignier T *et Al*, 2006), et de leur forte teneur en matières organiques, ces sols ont une très forte capacité de rétention de la molécule de chlordécone. Mais si les teneurs en chlordécone peuvent y être très élevées, la molécule y est fortement retenue et est très peu labile (Woignier, 2004 ; Cattan *et Al*, 2007 ; Cabidoche *et Al.*, 2008). Malgré cette faible biodisponibilité de la molécule pour ce type de sol, les cultures sensibles qui y sont produites sont cependant contaminées. Ces sols sont représentatifs des zones de production des racines et tubercules (igname, dachine, patate douce).

Le second type de sol retenu est le **nitisol**. C'est un intergrade entre un sol brun-rouille à halloysites (dérivés directs des andosols sous un climat très humide) en transition avec un ferrisol (sol plus évolué à smectites). Les argiles qu'il contient sont de type classique : argile en feuillet. Les nitisols sont donc des sols plus évolués que les andosols et possèdent des propriétés très différentes : s'ils retiennent moins la chlordécone, ils en relarguent aussi beaucoup plus vers la solution du sol, ce qui lui confère un fort potentiel de contamination. Ces sols sont caractéristiques de la frange atlantique et du centre de la Martinique (Woignier, 2004 ; Jannoyer M, 2007)⁵.

Dans le cadre de cette étude, en raison d'un manque de disponibilité de parcelles de type nitisol, le choix a été fait de compléter le dispositif avec une parcelle de type ferrisol. En effet, le comportement de ces deux types de sols par rapport à la rétention de la chlordécone est proche.

2.1.2 Deux niveaux de pollution

Pour chacun de ces sols, nous avons ensuite sélectionné deux niveaux de pollution pour la chlordécone. Pour un niveau de pollution du sol trop faible, la mesure du transfert de chlordécone vers la plante peut se révéler peu informative si la chlordécone n'est pas mesurée, nous nous sommes donc intéressés à des parcelles présentant des teneurs en chlordécone bien supérieures à ce que l'on retrouve habituellement dans les jardins familiaux. Nous avons distingués **deux niveaux de pollution** : « **fort** » et « **moyen** ». Le tableau suivant (Tableau 1) donne les intervalles de valeurs des deux niveaux de pollutions pour les deux types de sols choisis. Ces intervalles ont été déterminé de manière arbitraire pour cette étude réalisées sur sols très contaminés et ne saurait être utilisés pour caractériser les concentrations habituellement rencontrées dans les jardins ou les parcelles. Les valeurs sont exprimées en mg de chlordécone/ kg de Sol Sec (mg chld / Kg SS).

⁴ Cf annexe 3 : Cartes thématiques de la Martinique.

⁵ Cf annexe 3 : Cartes thématiques de la Martinique.

	Andosols	Nitisols, ferrisols
Moyennement pollué (mg/kg SS)	3- 5	1- 4
Fortement pollué (mg/kg SS)	7-12	5-7

Tableau 1 : Intervalles des valeurs de pollution des sols pour les deux niveaux choisis

2.1.3 Des agriculteurs volontaires

Les parcelles ont été ciblées en partenariat avec la Chambre d'Agriculture de la Martinique (CA-972), sur la base d'analyses de sol réalisées lors de la campagne de suivi des productions de racines et tubercules (arrêté préfectoral 2003). Une première liste de parcelles potentiellement intéressantes a ainsi été établie sur les critères « type de sol » et « niveau de pollution des sols ».

La liste finale des parcelles a été constituée sur la base du volontariat des agriculteurs ciblés, après un premier contact puis une visite de leur exploitation afin de s'assurer qu'ils répondaient bien aux besoins de notre étude (connaissance des 5 cultures à mettre en place, disponibilité, etc). Les parcelles expérimentales retenues sont des parcelles de 400 à 1000 m² (selon disponibilité). La liste finale des agriculteurs partenaires est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 2). Pour des raisons de confidentialité, l'identité et les coordonnées de chaque exploitation ne seront pas communiquées, chaque parcelle a été codée pour respecter leur anonymat. Les teneurs en chlordécone indiquées correspondent aux analyses fournies par la Chambre d'Agriculture et non aux prélèvements effectués dans le cadre des essais JAJA.

Nom	Type de sol	Teneur Chld (mg/kg)	Niveau de contamination	Localisation	Source
Ando_1	Andosol	17.2	fort	MORNE ROUGE	CA-972
Ando_2	Andosol	9.4	fort	MORNE ROUGE	PRAM-CIRAD
Ando_3	Andosol	4.2	moyen	MORNE ROUGE	CA-972
Niti	Nitisol	7.1	fort	SAINTE-MARIE	CA-972
Ferri	Ferrisol	3.9	moyen	DUCOS	CA-972

Tableau 2 : Liste finale des agriculteurs partenaires

Une convention a été établie entre chaque agriculteur et le Cirad⁶. Cette convention expose également le contexte de l'étude, les obligations des parties et les conditions de la collaboration.

La répartition des parcelles est indiquée sur la carte 3 présentée en annexe⁷.

⁶ Cf annexe 4 : Convention de collaboration agriculteur - Cirad

⁷ Cf annexe 5 : Carte de répartition des parcelles expérimentales sur la Martinique

2.2 Mise en place des essais

2.2.1 Etude de cinq cultures « à risque » ou « suspectes »

Trois légumes racines et deux cucurbitacées ont été sélectionnés en amont de la convention avec la DSDS, du fait de :

- leur forte sensibilité au transfert de chlordécone : lors des études précédentes, valeurs élevées de contamination ou proches de la Limite Maximale de Résidus définies pour la chlordécone ;
- leur importance dans les rations alimentaires des foyers identifiés comme à risque d'exposition élevé ;
- leur cycle (court, intermédiaire ou long selon les espèces) ;
- leurs modes de consommation différenciés (épluchage, cuisson).

Les trois légumes racines étudiés sont des productions identifiées comme sensibles car en contact direct avec le sol (Achard *et al.*, 2007 ; Cabidoche *et al.*, 2006).

La patate douce, *Ipomoea batatas*, (Figure 1 : Plant de patate douce), développe en 5 à 7 mois des tubercules dans le sol. Elle est consommée cuite, parfois épluchée avant cuisson, parfois pelée après cuisson.

Le dachine, *Calocasia antiquorum*, (Figure 2 : Plant de dachine) est une racine tubéreuse dont le cycle dure également 5 à 7 mois. Elle est consommée cuite et toujours épluchée.

L'igname, *Dioscorea spp.*, (Figure 3 : Plant d'igname), est un tubercule de cycle long (plus de 7 mois pour la variété choisie) consommé cuit et épluché.



Figure 1 : Plant de patate douce



Figure 2 : Plant de dachine



Figure 3 : Plant d'igname

(Source : Le jardin familial créole B.G.Descas éd. Désormeaux, 1986)

Le concombre et le giraumon sont des cucurbitacées dites « suspectes », d'une part parce que, lors de premières évaluations, des transferts non négligeables de chlordécone dans la plante ont été mesurés, et d'autre part, parce que la plante et son fruit se développent au sol

pendant des périodes plus ou moins longues et sont fréquemment souillés de terre ce qui pourrait induire une contamination plus importante du fait du contact.

2.2.2 Des variétés cultivées en jardins familiaux, des plants indemnes de chlordécone

Les plants utilisés sont fournis à l'agriculteur par le Cirad sous différentes formes (boutures, plants...). Ils doivent être indemnes de chlordécone, et issus d'une variété locale représentative des variétés utilisées habituellement par les particuliers en jardins familiaux ou dans les circuits de production informelle.

Les plants de patate douce sont produits par un agriculteur fournisseur de plants indemnes de chlordécone (parcelles jamais plantées en banane) et sains. La variété de patate douce est dite « locale » (nous ne disposons pas de plus de précision). Les plants sont des sections de tiges, boutures à planter directement sur la parcelle. **Les plants de dachine**, de variété locale également (dachine « blanc » et dachine « violet ») sont également produits sur une parcelle indemne de chlordécone. La patate douce et le dachine ne reçoivent aucun traitement avant implantation.

L'igname est cultivée à partir de semenceaux de variété BOUTOU fournis par la CA-972, également exempts de chlordécone. Les semenceaux utilisés sont des sections de tubercules de 50 à 150 grammes préparées par le Cirad, tronçonnées puis séchées au soleil de manière à limiter les attaques fongiques et bactériennes. BOUTOU est une variété hybride INRA tardive utilisée par la CA-972 pour ses études, résistante à l'antracnose et à production abondante (INRA, <http://www.inra.fr/presse/ignames>). La dormance des tubercules fournis est levée au préalable par la CA-972. L'igname supporte mal l'excès d'eau, on privilégie donc une parcelle ensoleillée et bien drainée (Manuel du planteur, CA-972).

Le concombre et le giraumon sont produits à partir de graines semées en terreau sous serre pépinière. Les variétés, concombre F1 ODYSSEY et giraumon F1 MARTINICA, couramment utilisées par les particuliers, sont choisies pour être représentatives de ce qui est cultivé en jardins familiaux. Les jeunes plants indemnes de chlordécone, sont plantés au stade 2 feuilles vraies. Ils ne reçoivent aucun traitement avant l'implantation sur la parcelle, ensuite les traitements sont appliqués selon la décision de l'agriculteur exploitant la parcelle.

2.2.3 Les 5 légumes sont plantés en association

Les légumes cultivés sont plantés en association, pour :

- **limiter l'espace mobilisé** chez l'agriculteur ;
- disposer d'un dispositif permettant des prélèvements avec un **maillage rendant compte de la variabilité spatiale de la pollution du sol** ;
- **éviter d'avoir des effets de « bloc »** (effet selon lequel les individus statistiques d'une étude deviennent interdépendants pour un bloc) **ou autre effet de « bordure »** (les individus du bord de la parcelle ne reçoivent pas les mêmes conditions qu'en son centre et sont donc écartés de l'étude), habituels en expérimentations sur du matériel végétal ;
- **réduire la pression des maladies et des ravageurs** (plus il y a d'espèces végétales différentes au sein de la parcelle, plus le frein au développement des populations

d'organismes nuisibles spécifiques est fort) et **faciliter le contrôle des adventices** du fait de la couverture de certaines cultures (patate douce, cucurbitacées).

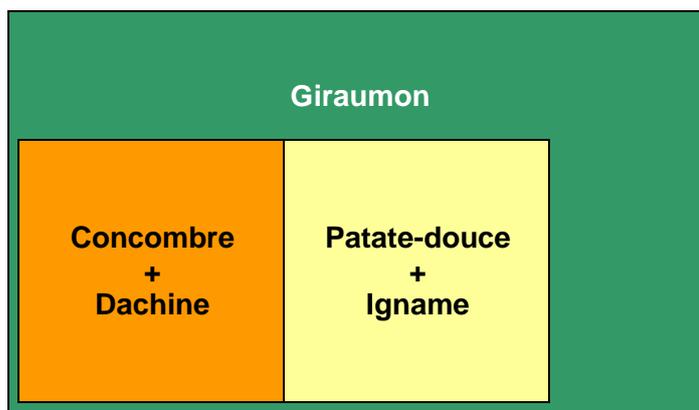


Figure 4 : Schéma d'implantation d'une parcelle expérimentale type

Pour chaque culture 30 répétitions sont mises au champ, afin de disposer de 20 prélèvements à la récolte (choix de plants homogènes, limitation des effets bordures, limitation du risque de perte de plants du fait d'attaques de ravageurs, ...).

La patate douce et l'igname sont plantées en alternance de sorte à valoriser un effet de compétition pour l'eau et à optimiser le contrôle des adventices. La patate douce s'installe rapidement et développe un système racinaire fasciculé et dense qui tend à diminuer la quantité d'eau disponible pour l'association (apprécié notamment au nord de l'île où les précipitations sont très abondantes et où l'excès d'eau est fréquent). Elle est très couvrante et limite le développement des mauvaises herbes. L'igname, plus tardive et moins vigoureuse que la patate-douce est très sensible à l'excès d'eau (notamment à la germination). Dès le deuxième mois de croissance, l'igname est tuteurée de sorte à éviter les contaminations telluriques et à favoriser sa croissance (liée à l'ensoleillement notamment) ;

Concombres et dachines sont également plantés en alternance. Les effets recherchés sont la compétition hydrique (le concombre est sensible à l'excès d'eau) et la couverture du sol par la cucurbitacée.

Le giraumon a tendance à occuper beaucoup d'espace lors de sa croissance. Pour favoriser son développement et faciliter son suivi, le giraumon est planté seul en placettes. Dans certains cas, deux pieds sont plantés ensemble. Les plants développent des racines à chaque nœud le long de la tige.

Les parcelles ont toutes été implantées selon le schéma de la Figure 5. Cependant, selon la disponibilité de surface et les pratiques habituelles de l'exploitant agricole, l'espacement entre les pieds peut être variable. La mise en place de la parcelle est réalisée par le CIRAD et l'agriculteur.

Les quatre schémas suivants montrent les dispositifs mis en place à ce jour (Figure 5 à Figure 9 : Parcelles expérimentales).

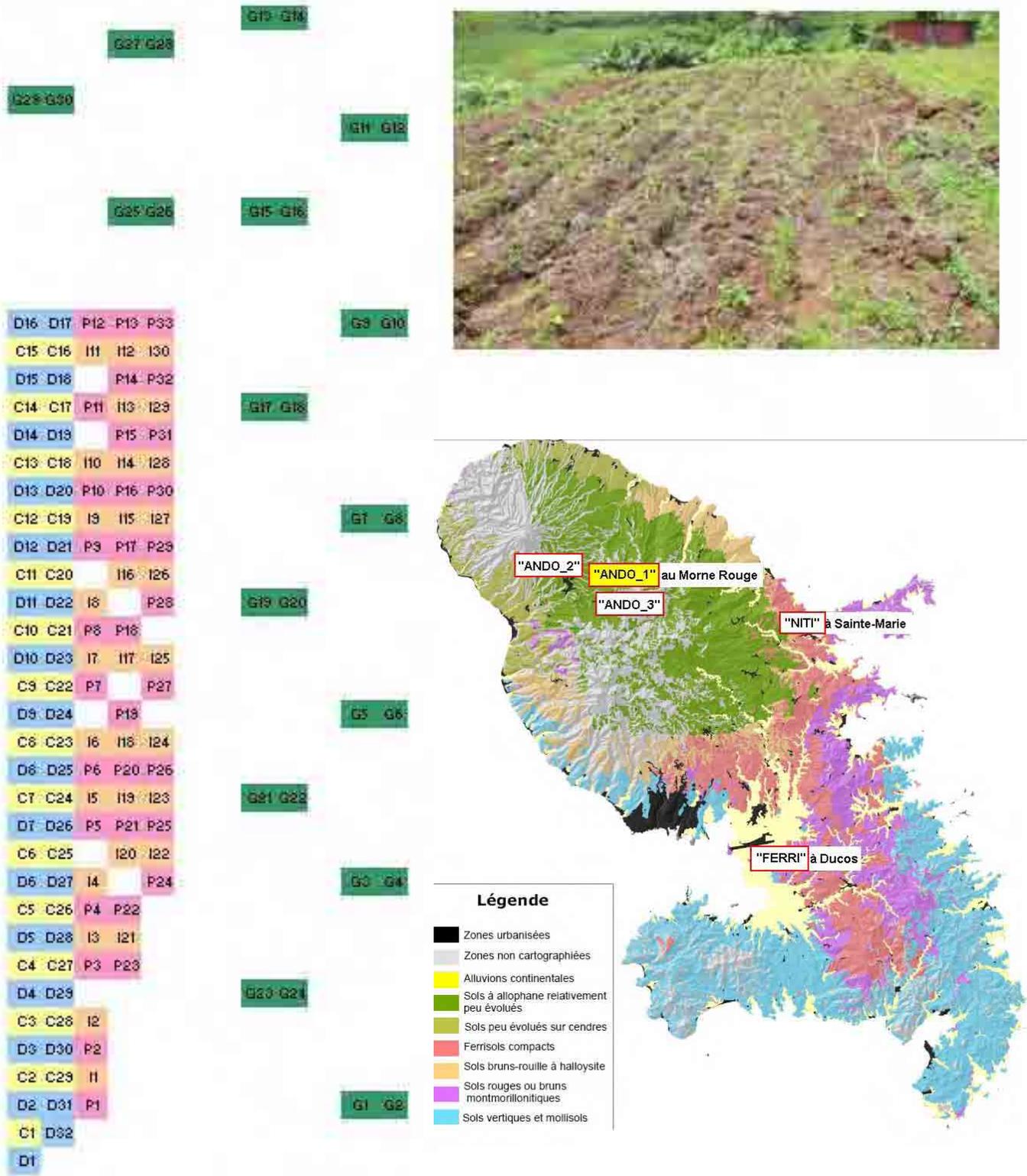


Figure 5 : Parcelle expérimentale « Ando_1 »

				C9	D27		
C9	D9	C10	D10	C10	D26	C28	D28
C8	D8	C11	D11	C11	D25	C29	D29
C7	D7	C12	D12	C12	D24	C30	D30
C6	D6	C13	D13	C13	D23	C31	D31
C5	D5	C14	D14	C14	D22		
C4	D4	C15	D15	C15	D21		
C3	D3	C16	D16	C16	D20		
C2	D2			C17	D19		
C1	D1	C17	D17	C18	D18		



G29-G30	P18	D0
	H7	D9
	P17	
G27-G28	H6	P30
	P16	D8
	H5	
G25-G26	P15	P29
	H4	D7
	P14	
G23-G24	H3	P28
	P13	D6
	H2	
G21-G22	P12	P27
	H1	D5
	P11	
G19-G20	H0	P26
	P10	D4
G17-G18	B	
	P9	P25
G15-G16	B	D3
	P8	
	F	P24
G13-G14	P7	D2
	B	
G11-G12	P6	P23
	B	D1
G9-G10	P5	
	M	P22
G7-G8	P4	D0
	B	
G6-G6	P3	P21
	D	H9
G3-G4	P2	P20
	H	H8
G1-G3	P1	P19

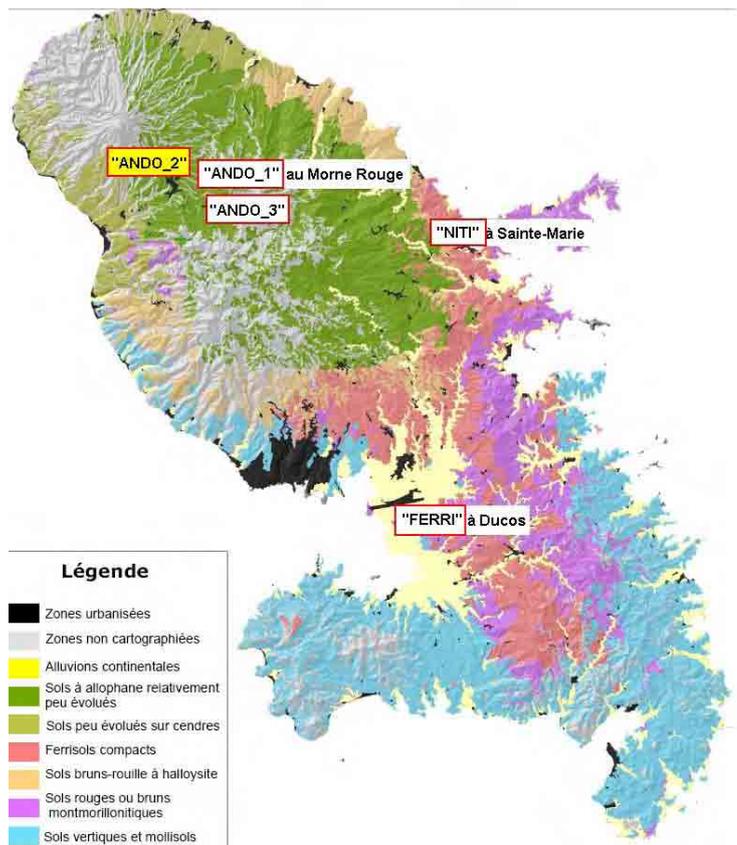


Figure 6 : Parcelle expérimentale « Ando_2 »

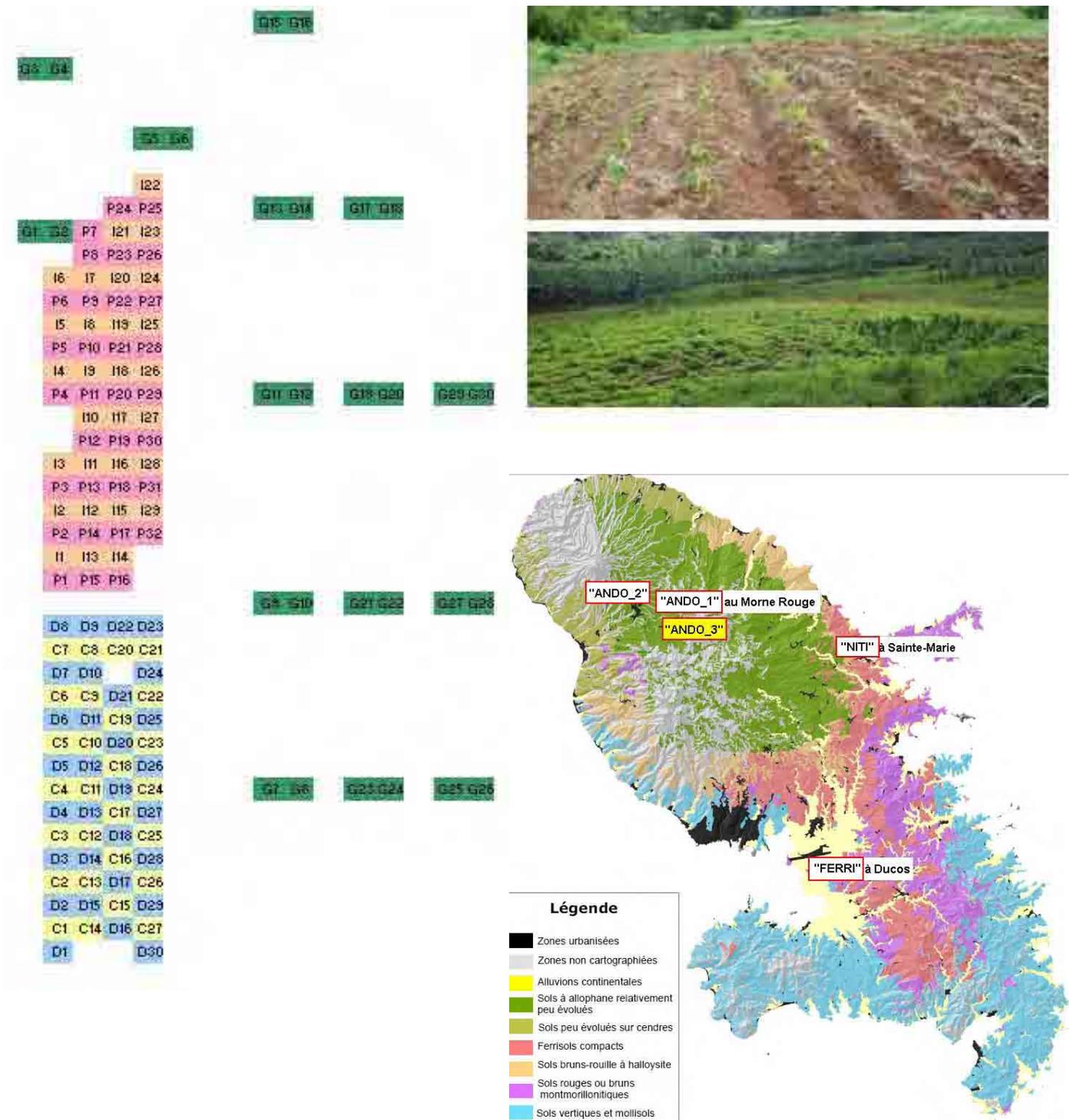


Figure 7 : Parcelle expérimentale « Ando_3 »

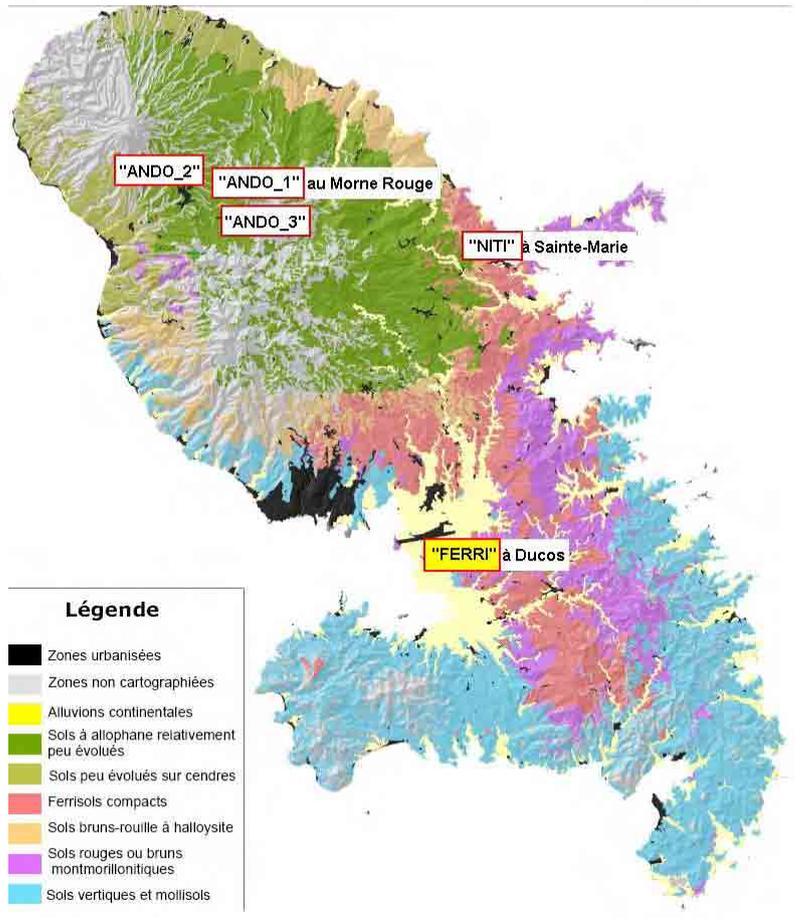
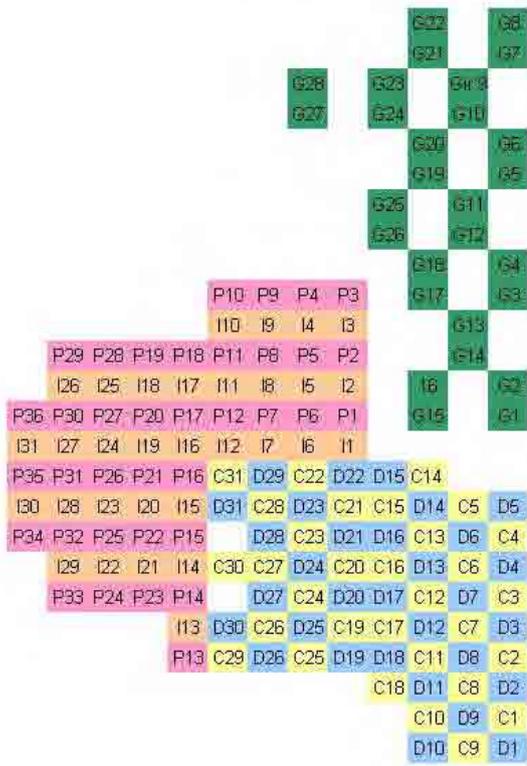


Figure 8 : Parcelle expérimentale « Ferri »

		I1	I2	I3	I4				
		P1	I5	P2	G28	I6	P3	I7	
	P4	I8	P5	I9	G29	P6	I10	P7	
P8	I11	P9	I12	P10	G30	I13	P11	I14	P12
									G31

GOMBOS * 5 rangs

P13	I15	P14	I16	P15	I17	P16	I18	P17	I19	P18	
P19	I20	P20	I21	P21	I22	P22	I23	P23	I24	G5	P24
P25	I25	P26	I26	P27	I27	P28	I28	P29	I29	P30	
G20	G18	G18	G17	G16	G15	G14	G13	G12		D1	G11
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9		G10
		G21	G22	G23	G24	G25	G26	G27	G28		
C1	D2	C2	D3	C3	D4	C4	D5	C5	D6	C6	
			C7		D7	C8		D8	C9	D9	C10
									D10	C11	D11
									D15	C16	C17
									D16	C18	
									D17	C19	
									D18		C20
											D19
											C21
									D20	C22	D21
									C23	D22	C24
									D23	C25	C26
									D24	C27	C28
									D25	C29	C30
									D26	C31	C32
									D27	C33	

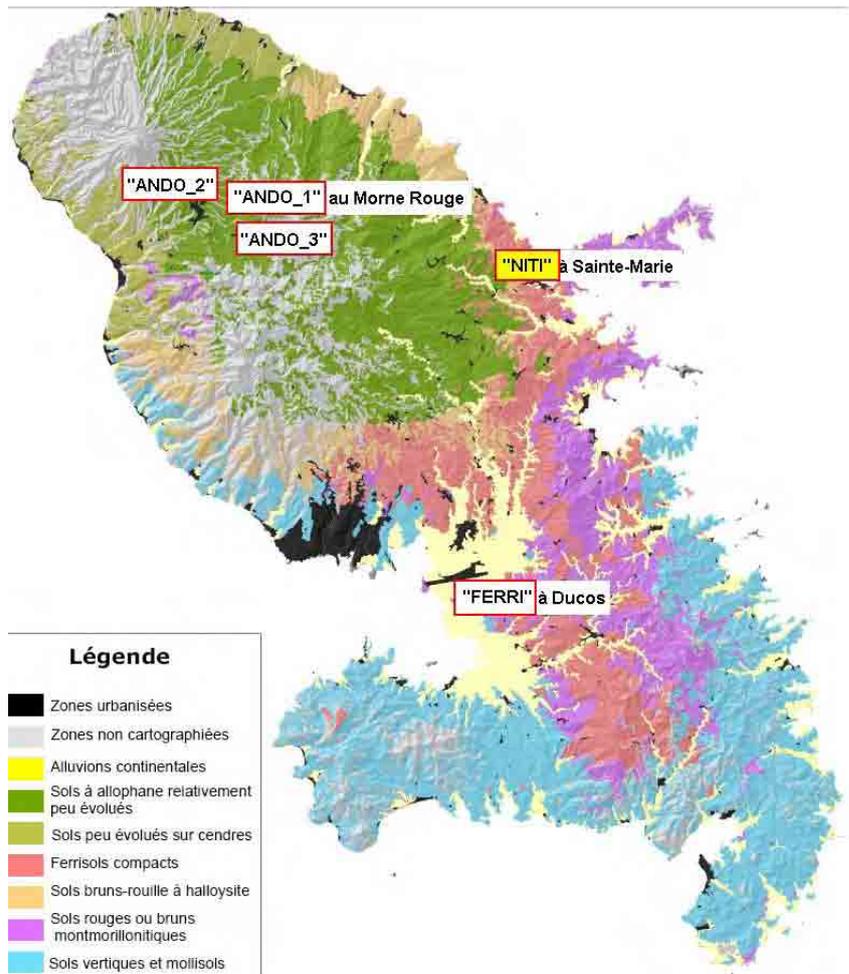


Figure 9 : Parcelle expérimentale « Niti »

2.3 Sécuriser les résultats : expérimentations en milieu contrôlé

Face aux problèmes de retard rencontrés lors de la mise en place des parcelles expérimentales et aux aléas liés à l'expérimentation en plein champ, le CIRAD a décidé de mettre en place un nouvel essai sur le transfert de chlordécone du sol vers les cultures en milieu contrôlé afin de s'affranchir de certains problèmes rencontrés sur les parcelles (conditions climatiques et géographiques, disponibilité des agriculteurs, ...).

Un dispositif réduit a été mis en place sous serre au Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique : deux sols fortement pollués (Ando_2 et Niti) et trois cultures (concombre, patate douce, dachine) ont finalement été retenus.

Le sol a été prélevé sur les exploitations « Ando_2 » (andosol, 9,4 mg chld/KgSS) et « Niti » (nitisol, 7,1 mg chld/KgSS), transporté dans des bacs de 80 L. Il a été stérilisé à la vapeur (110°C pendant 1 heure), de sorte à éliminer tous les germes, bactéries, champignons et graines d'adventices, nuisibles aux cultures, en particulier *Ralstonia solanacearum*, bactérie responsable du flétrissement bactérien, très fréquent sur les solanacées en Martinique, mais dont une souche très virulente s'attaque également aux cucurbitacées. Puis le sol a été homogénéisé par mélange afin d'obtenir des sols de teneur similaire en chlordécone dans les différents pots. Les pots sont installés sur une table afin de limiter les contacts et enracinements dans le sol de la serre. Le dachine, la patate douce et le concombre ont été plantés dans des pots de 25 et 35 L. La serre est prévue pour limiter l'intrusion d'insectes. La ferti-irrigation, automatisée, s'effectue par asperseurs (buses brumisatrices). La solution nutritive injectée dans le circuit d'irrigation est une solution de démarrage pépinière (utilité première de la serre). Un complément minéral solide (N,P,K) est apporté aux pieds aux stades de développement clefs.

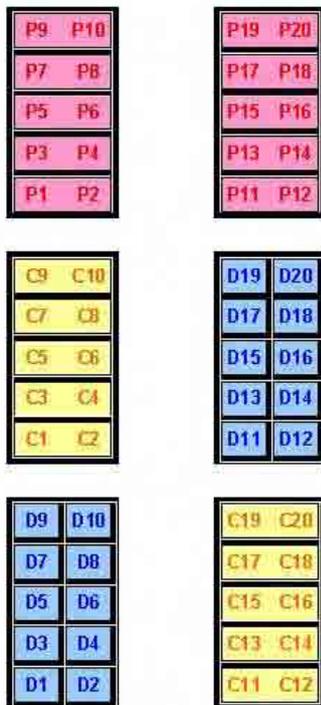


Figure 10 : Dispositif de l'essai sous serre

ANDOSOL
9.4 mg chld
/ kg SS

NITISOL
7.1 mg chld
/ kg SS

Les concombres sont plantés deux par deux dans des bacs de 35 L. Ils sont rapidement tuteurés de sorte à ce que les fruits ne touchent pas la terre. En éliminant le contact des concombres avec le sol, nous testons de façon contrôlée la capacité de transfert des plants de concombre, tandis que les deux voies de contamination sont indistinctement testées au champ : contamination par contact et par transfert (situation classique de culture).

Deux plants de patate douce sont cultivés dans chaque bac de 35 L. Afin d'éviter le contact avec la table, les patates douces ont été, elles aussi, tuteurées.

Le dachine est planté individuellement dans des bacs de 25 L.

3 Suivi des expérimentations

3.1 Suivi régulier des parcelles expérimentales

L'exploitant agricole s'engage à réaliser la conduite des cinq cultures selon l'itinéraire technique qui lui semble le plus adapté, ce qui implique qu'il connaisse nécessairement chacune des cultures. L'ensemble des travaux d'irrigation, de fertilisation et de protection des cultures sont réalisés par l'agriculteur, et doit donner lieu à un suivi de sa part. A la fin de la campagne, il est prévu que l'agriculteur remette au Cirad une fiche récapitulant tout ce qui a été réalisé.

Notons que, dans la pratique, les exploitants choisis ne connaissent que rarement les 5 cultures et, par peur de « mal faire » ou par manque de temps entretiennent peu ou pas les parcelles d'expérimentations.

En parallèle, un agent du Cirad réalise un suivi précis et régulier des cultures. Les plants qui semblent présenter des symptômes d'attaque de *Ralstonia solanacearum* sont analysés en laboratoire au PRAM pour confirmation du diagnostic. En cas d'attaque ou de carences du développement, les plants sont remplacés et les pratiques de l'agriculteur adaptées (fertilisation, désherbage, traitements phytosanitaires) à la demande du Cirad. Le suivi permet également de récolter les légumes à terme, de sorte à rester représentatif des pratiques en jardins familiaux. Plus les visites sont fréquentes, plus la récolte peut être fine, et les résultats représentatifs. L'agent responsable des suivis consigne les actions effectuées, problèmes rencontrés et mesures prises dans le calendrier de suivi (tableau 3).

3.2 Suivi individuel des plants

Parce que les récoltes de giraumons, concombres et patates-douces se font en plusieurs fois (les récoltes peuvent s'étendre sur plusieurs mois), il est indispensable d'organiser un suivi individuel de chaque plant. Cette identification précise permet une traçabilité des fruits récoltés et permet l'analyse concomitante du fruit et du sol à proximité.

Le protocole de suivi des expérimentations comprend donc **un plan simplifié des essais** mentionnant chaque plant selon un identifiant unique, son stade de développement et son état sanitaire. Les qualificatifs utilisés permettent de décrire le développement des plants (stade, vigueur et état sanitaire) pour l'ensemble des espèces. L'appréciation de ces critères est faite de façon qualitative par l'agent de terrain.

Compte tenu du caractère qualitatif de ces appréciations, une **fiche de suivi** est remplie, mentionnant toutes les **remarques** éventuelles de l'agent, intégrant des photographies de **l'aspect général** des parcelles, et des **caractères particuliers** des plants (maladie, stades, etc.). Des **prélèvements** peuvent également être réalisés au besoin.

4 Protocole de récolte

Notre objectif est de caractériser les transferts « sol-plante » de chlordécone et d'étudier l'impact des modes de préparation des légumes sur leur niveau de contamination. Pour cela, chaque prélèvement de plante sera couplé à un prélèvement de sol (profondeur 0-30cm). Compte-tenu de la forte variabilité spatiale (très locale) de la teneur en chlordécone dans le sol, nous devons **donc prélever l'organe à récolter ainsi qu'un échantillon de sol au pied de chaque plant et, pour les giraumons, près du fruit.**

4.1 Prélèvement de l'organe

Nous avons vu que les essais sont organisés de façon à permettre le suivi individualisé des plants, car les récoltes de giraumons, concombres et patates douces sont étalées dans le temps. Si plusieurs récoltes sont faites pour un même pied, nous les analysons de préférence individuellement (de sorte à tester également la dynamique des transferts de chlordécone dans le temps).

Dans le cas du concombre et de la patate douce, l'ensemble des organes récoltés pour un même pied (et pour une seule récolte), sont collectés dans un même sac plastique, identifié comme suit : *Jafa ; Id exploitation ; Id espèce ; numéro du plant ; numéro de récolte.*

Enfin, dans le cas particulier du giraumon, chaque fruit doit être analysé séparément et sera récolté dans un sac plastique unique. Nous ajoutons en fin d'identifiant la lettre correspondant à l'ordre des fruits sur le plant ; le premier fruit à partir du pied est noté « A ». Dans le cas où le plant comporte un fruit, nous le notons aussi « A ». Pour les pieds à plusieurs branches, nous donnons une lettre différente à chaque fruit (ne pas reprendre « A » pour le premier fruit d'une seconde branche par exemple).

Identifiant : *Jafa ; Id exploitation ; Id espèce ; numéro du plant ; numéro de récolte, lettre du fruit*

L'igname et le dachine se récoltent en une fois. L'ensemble des organes récoltés pour un même pied est collecté dans un unique sac plastique et identifié comme suit : *Jafa ; Id exploitation ; Id espèce ; numéro du plant.*

Remarque : Il est important de ne pas souiller de terre les organes aériens au cours de leur prélèvement et de leur manipulation afin de ne pas les contaminer et induire un biais dans l'analyse.

4.2 Prélèvement de sol

Pour rendre compte des transferts « sol-plante », les organes de chaque plant ainsi que le sol qui l'a alimenté font l'objet d'une recherche de résidus de chlordécone. Pour cela, en fin

de campagne de récolte, des échantillons de sol représentatifs de la rhizosphère de chaque plant sont prélevés.

Pour l'ensemble des espèces sauf giraumon, deux prélèvements de sol sont effectués sur la profondeur 0-30 centimètres (profondeur habituelle de travail du sol) pour chaque pied : l'un sur le rang proche du plant et l'autre dans l'inter-rang (croix rouges sur la figure 7). Pour cela, nous utilisons une tarière de 6-8 centimètres de diamètre, calibrée à 30 cm. Les deux prélèvements de sol de chaque plant sont collectés dans un unique sac en plastique afin de constituer un échantillon composite et identifiés comme suit : *Jafa ; Id exploitation ; Id espèce ; numéro du plant, « S »*.

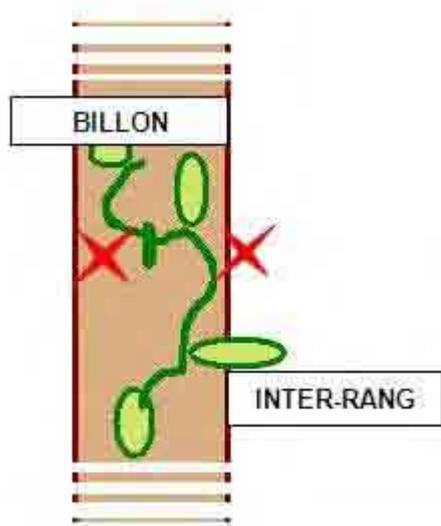


Figure 11 : Points de prélèvement de sol pour chaque plant analysé (croix rouge)

Notons que pour le Giraumon, les prélèvements seront effectués d'une façon particulière. Les plants courent au sol et la distance qui sépare le fruit du pied peut être grande. Compte-tenu de la forte variabilité spatiale de la teneur en chlordécone dans le sol, il est indispensable, pour tester les deux voies de contamination (transfert et contact), de prélever en plusieurs sites (au pied et au niveau des fruits à récolter). Deux prélèvements sont donc à faire par point d'échantillonnage.

Chaque site échantillonné (deux points d'échantillonnage) constitue un échantillon composite et est analysé de façon indépendante. Pour les distinguer, une lettre est attribuée à chaque site. Le pied a l'identifiant « S0 », puis les prélèvements sous les fruits ont l'identifiant du fruit (SA, SB, SC, etc. ; voir Figure 12 : Points de prélèvement pour le giraumon (croix rouge)).

Les identifiants attribués sont donc comme suit : *Jafa ; Id exploitation ; Id espèce ; numéro du plant ; « S lettre du site »*

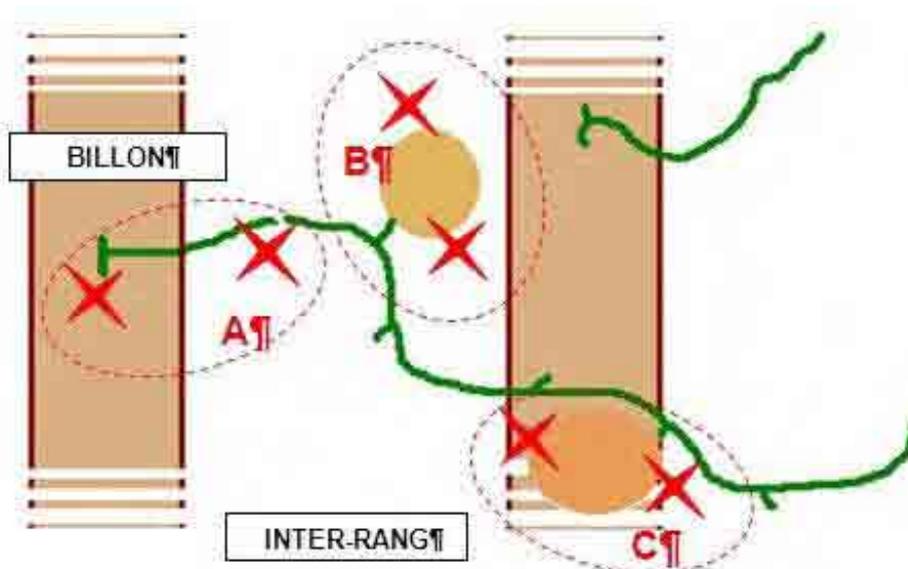


Figure 12 : Points de prélèvement pour le giraumon (croix rouge)

4.3 La récolte

Les suivis réguliers permettent de déterminer plus précisément la date de récolte de chaque culture. Les récoltes sont effectuées à terme, mais, dans le cas des espèces à cycles courts (concombre, giraumon), les récoltes tardives sont préférées de sorte à maximiser (plutôt que de minimiser) les transferts éventuels de chlordécone. Cependant, pour limiter les risques de perte de récolte (attaque de rats, attaque de *Ralstonia*, ...), les récoltes peuvent être anticipées au cas par cas et de ce fait légèrement précoces par rapport à une récolte classique.

Le Cirad s'engage à racheter la récolte à l'exploitant agricole au prix du marché. Pour cela, nous nous référons aux tarifs moyens de la SOCOPMA pour l'année 2008. Une majoration de 10% est appliquée sur ce tarif pour rémunérer également « l'effort » coopératif des agriculteurs envers le Cirad. Le Cirad s'engage également à effectuer les prélèvements prévus (sol et plante) à la récolte, en présence de l'exploitant agricole si celui-ci le désire.

Le suivi des récoltes est réalisé par le Cirad. Chaque récolte est répertoriée et pesée. La récolte une fois complète, donne lieu à une facturation. Le Cirad s'engage à communiquer les résultats des analyses de sols et de végétaux à l'agriculteur.

5 Préparation et suivi des échantillons

5.1 Préparation des échantillons

5.1.1 Préparation des échantillons végétaux

Rappelons que les modes de préparation à l'étude sont l'épluchage d'une part et la cuisson d'autre part, en fonction des modalités habituelles de consommation des légumes (cuits ou non, épluchés ou non).

Pour le concombre, rarement cuit et parfois épluché, sont analysés le fruit entier (Fe), la peau (Pe) et la pulpe (Pu).

Pour le giraumon, l'igname et le dachine, systématiquement consommés cuits et épluchés, nous analysons le fruit entier, la peau, la pulpe et la pulpe cuite (PuC).

Enfin, pour la patate douce, consommée cuite, parfois épluchée et parfois pelée, les analyses portent sur le fruit entier, la peau, la pulpe et la pulpe cuite.

Résumé du protocole de préparation des échantillons crus⁸:

- La récolte est systématiquement pesée (Matière Fraîche), pour le calcul de la rétribution du producteur.
- Les fruits sont ensuite lavés consciencieusement (aucun résidu de sol ne doit être mélangé aux échantillons végétaux). Un premier lavage est réalisé à l'eau du robinet afin d'éliminer toute trace de terre visible sur l'échantillon puis un second lavage est effectué à l'eau distillée. Pour les légumes racine, un brossage est réalisé avant le lavage. Dans le cas des patates douces, le brossage doit être doux afin de préserver la fine peau recouvrant les tubercules.
- Les fruits sont coupés en quartiers homogènes (symétrie axiale pour les cucurbitacées)
- La pulpe et la peau sont séparées (épluchage 3 mm au couteau), les quartiers de fruit entier conservés.
- Selon la culture, la pulpe et/ou fruit entier sont cuits : eau 100°C avec test de cuisson au couteau (la pointe doit pénétrer facilement, représentant la pratique usuelle des ménages)
- Les échantillons sont pesés à la balance de précision, emballés, étiquetés, mis sous vide et thermosoudés puis congelés à -18°C avant expédition.
- Pour l'expédition au laboratoire d'analyses (LDA26, Valence, France), les échantillons sont envoyés par colis express isotherme et réfrigéré par carboglace.

Résumé du protocole de préparation des échantillons cuits⁹:

- Les échantillons de pulpe sont cuits individuellement dans l'eau distillée afin d'éviter toute contamination par les éventuelles traces de chlordécone dans l'eau du robinet.
- La cuisson est considérée comme achevée lorsque la pointe d'un couteau s'enfonce sans difficulté dans les morceaux de légumes.
- Après avoir égoutté, la pulpe cuite est récupérée et ensachée.
- L'eau de cuisson de certains échantillons a été prélevée pour analyse.

5.1.2 Préparation des échantillons de sol

Les échantillons de sol sont séchés à l'air libre sous hangar. Une fois secs, ils sont désagrégés manuellement à l'aide d'un pilon puis passés au broyeur¹⁰.

Une homogénéisation finale est réalisée avant conditionnement en sachet plastique propre ou flacon 500 mL (fourni par le LDA972) pour expédition ou livraison au laboratoire d'analyse.

⁸ Cf annexe 6 : Protocoles de préparation des échantillons végétaux et de sol

⁹ Cf annexe 6 : Protocoles de préparation des échantillons végétaux et de sol

¹⁰ Cf annexe 6 : Protocoles de préparation des échantillons végétaux et de sol

5.2 Suivi des échantillons

Les premiers échantillons de sol ont été expédiés au LDA26, les suivants au LDA972 afin de réduire les délais de retour des résultats d'analyses et gagner en flexibilité tout en bénéficiant de la même technologie qu'au LDA26. Par la même, nous contribuons à l'accréditation du laboratoire et au lancement des analyses réalisées localement par le LDA

Le nombre d'échantillons préparés et expédiés à ce jour aux LDA26 et LDA972 est synthétisé dans le tableau 3.

Pour avoir une quantité suffisante de matériel à analyser, les échantillons de différentes récoltes d'un même pied ont parfois été rassemblés. L'échantillon est alors un échantillon composite pour un même plant récolté à plusieurs dates.

D'autre part, si 30 répétitions ont été mises en place pour chaque culture et sur chaque parcelle afin d'obtenir 20 échantillons, seuls 10 ont été sélectionnés pour analyse. Ceci conformément aux termes prévus dans la convention DSDS-Cirad¹¹. Nous avons alors cherché d'une part à avoir un certain nombre d'échantillons considérés comme représentatifs des fruits consommés habituellement ainsi que quelques représentants de spécimens particulièrement gros ou, au contraire, petits (avec, pour ces derniers, la limite de la quantité de matériel végétal nécessaire à l'analyse).

Disposant de peu d'informations sur le concombre et le giraumon ; deux cultures considérées comme « suspectes » en terme de transfert de chlordécone sol-plant, le choix a été fait d'envoyer le maximum d'échantillons pour conforter les premiers résultats obtenus dans le cadre de l'établissement des référentiels sol/plante (action 30 du Plan National d'Action Chlordécone).

La différence de nombre entre les échantillons préparés et ceux expédiés, s'explique donc, d'une part, par les échantillons stockés au Cirad en vue d'expédition et, d'autre part, par les échantillons préparés mais non sélectionnés pour analyse.

Type	Plants mis en place	Echantillons préparés	Echantillons expédiés
Concombre	170	109*3=327	88*3=264
Giraumon	150	267	51*3+47=200 ¹²
Patate douce	170	730	50*4=200
Dachine	170	236	35*4=140
Igname	150	276	40*4=160
Total	810	1836	964
Sol	/	261	261
Total	/	2097	1225

Tableau 3 : Nombre d'échantillons récoltés et expédiés - Chaque modalité (Fe, Pu, Pe et PuC) correspond à un échantillon

¹¹ Cf. Annexe 1 : Convention de collaboration DSDS - Cirad

¹² Un compartiment pulpe cuite (PuC) n'a été constitué que pour 47 des 51 répétitions sélectionnées pour analyse des compartiments crus.

Chapitre 2 : Résultats

1 Avancement de l'étude

1.1 Avancement dans la réalisation

La réalisation de cette étude implique la gestion des contraintes liées à toute expérimentation sur parcelles en partenariat avec des agriculteurs : aléas climatiques, attaques de nuisibles aux cultures, manque de disponibilité des agriculteurs, nécessité de composer avec les impératifs (notamment de temps) des travaux au champ et en laboratoire.

D'autre part, cette étude se heurte aux délais d'analyse du LDA26. Il s'écoule généralement trois à quatre mois entre l'expédition des échantillons et la réception des résultats. C'est d'ailleurs une des raisons majeures qui ont motivé le choix de faire analyser les échantillons de sol au Laboratoire Départemental d'Analyses de la Martinique où, bien que le flux d'analyse soit limité à 20 échantillons par semaine, les délais sont de l'ordre de cinq semaines. Cependant, ce laboratoire est équipé pour les analyses de résidus de chlordécone sur matrices sol et eau mais pas sur matrice végétale.

L'implantation des cultures a été achevée en juin 2009. En mars 2010, la récolte d'igname a été achevée, clôturant le cycle de toutes les cultures.

Ce sont environ 1000 échantillons végétaux et plus de 260 échantillons de sol qui ont été analysés dans le cadre de cette étude.

La Figure 13 présente sous forme de diagramme de Gantt les différentes tâches du projet ainsi que leur planification pour les années 2009 et 2010. Les actions relatives à la rédaction du rapport et à la communication des résultats sous différentes forme sont programmées pour perdurer en 2011 voire au delà.

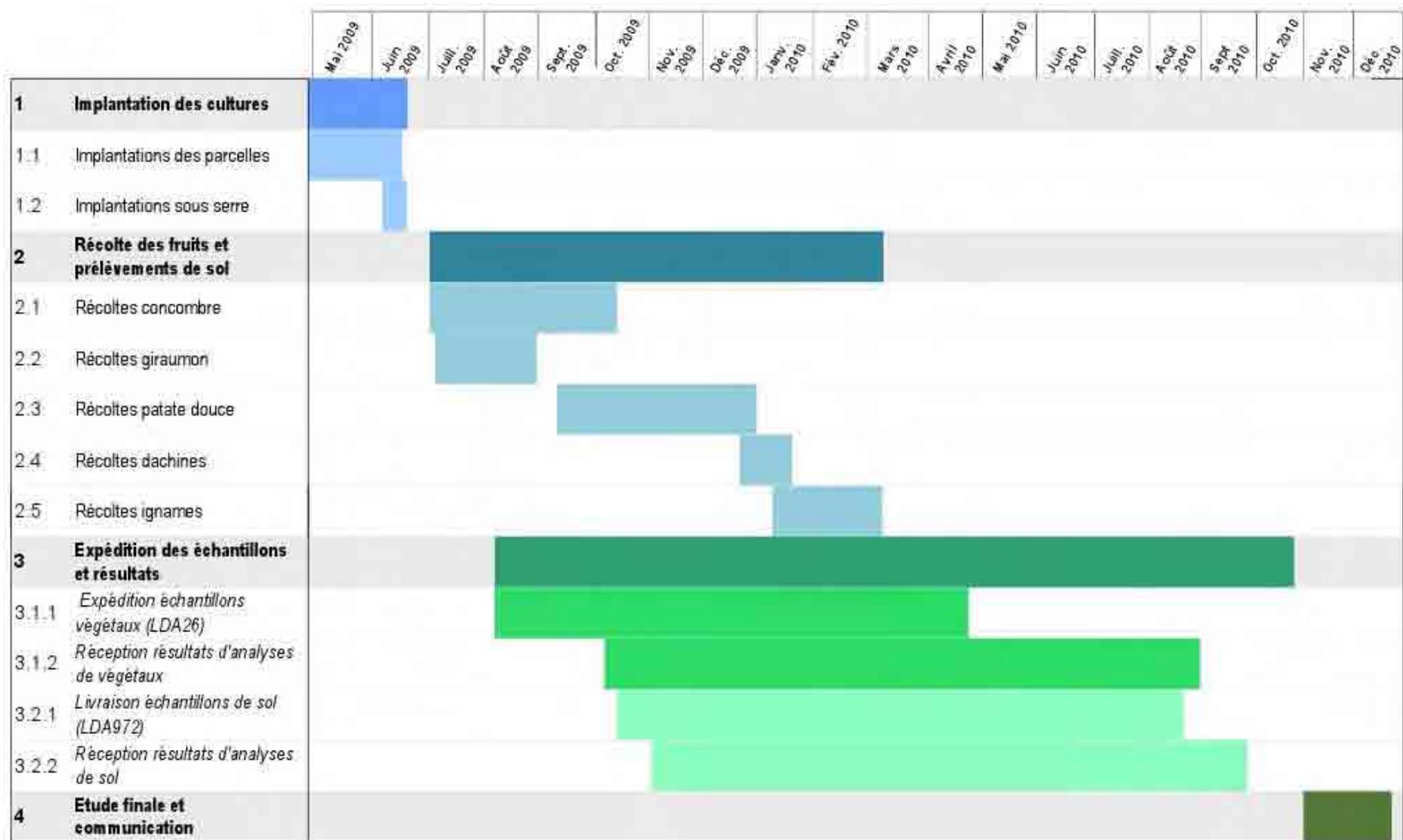


Figure 13 : Diagramme de Gantt de la planification des tâches du volet recherche du programme Jafa

1.2 Traitement des résultats

Les échantillons de végétaux ont tous été analysés au Laboratoire Départemental d'Analyses de la Drôme (LDA26). Les derniers résultats, correspondant aux expéditions du printemps 2010, nous ont été communiqués en septembre 2010.

Hormis 7 échantillons expédiés en tout début de projet au LDA26, les analyses de recherche de résidus de chlordécone ont été réalisées au LDA de Martinique en ce qui concerne le sol. Celui-ci nous a fourni début octobre les résultats d'analyse pour les sols livrés durant l'été, clôturant ainsi la campagne principale d'analyses du projet.

Cette étude s'inscrivant dans le cadre d'une évaluation de risque pour la santé humaine et de protection des consommateurs, la décision a été prise de maximiser le calcul de risque en additionnant les teneurs en chlordécone et en son principal métabolite, la chlordécone 5b hydro. Ce choix a été motivé, d'une part, par la suspicion que le processus d'analyse entraînerait une dégradation de la chlordécone en chlordécone 5b hydro et, d'autre part, par l'absence de données permettant d'envisager que ce métabolite présente un risque plus faible pour la santé des consommateurs. Tout au long de ce rapport, la teneur en chlordécone d'un échantillon représente donc en fait la somme des teneurs en chlordécone et en chlordécone 5b hydro.

Pour chaque culture, les résultats sont enregistrés dans une base de données propre au programme Jafa¹³. Par ailleurs, les résultats du programme Jafa servent à abonder une base de données plus globale contenant les résultats des analyses de recherche de résidus de chlordécone effectuées dans le cadre des différents programmes du Cirad depuis 2007.

Lorsque les résultats sont détaillés par dispositif, les noms des parcelles ont été remplacés par des identifiants afin de respecter l'engagement de confidentialité que nous avons pris vis-à-vis des agriculteurs.

¹³ Cf. annexe 7 : Résultats bruts des analyses effectuées dans le cadre du programme Jafa

2 Résultats pour le concombre

Concernant les pratiques culturales du concombre, l'installation d'un dispositif sous serre, où les plants ont été tuteurés permet de sécuriser des résultats tout en testant l'hypothèse selon laquelle les transferts de chlordécone sol/plant s'effectueraient principalement par contact.

2.1 Ventilations des teneurs et taux de conformité

2.1.1 Ventilation des teneurs en chlordécone mesurées

Il convient tout d'abord de s'intéresser aux mesures de résidus de chlordécone dans les échantillons de sol. Pour ces premiers résultats, obtenus pour les concombres dans le cadre du programme JAJA, nous disposons de données concernant une parcelle de type andosol, une parcelle de type ferrisol ainsi que le dispositif sous serre pour lequel un andosol et un nitisol ont été utilisés. Il est à noter que l'andosol du dispositif expérimental sous serre (Ser) provient de la parcelle « Ando2 » pour laquelle nous avons également des résultats au champ ; en revanche, si le nitisol utilisé sous serre a bien été prélevé sur la même exploitation que « Niti », il ne s'agit pas de la même parcelle. Les cultures de concombres ayant été ravagées sur plusieurs dispositifs au champ, nous n'avons pas obtenu de données pour les autres sols. Nous disposons donc de résultats concernant trois sols distincts sur les six du dispositif expérimental.

Étiquettes de lignes	Moyenne	Min	Max	Ecartype
Andosol	8,688	5,720	10,580	1,478
Champ	8,254	5,780	10,230	1,412
Serre	9,035	5,720	10,580	1,460
Ferrisol+Nitisol	3,518	2,600	4,400	0,427
Champ	3,361	2,600	3,910	0,358
Serre	3,910	3,260	4,400	0,322
Total général	5,274	2,600	10,580	2,624

Tableau 4 : Concombre - Concentrations en chlordécone du sol par type et par parcelle (mg/kg de sol sec)

Sur andosol, la teneur moyenne du sol en chlordécone est de 8.69 mg/kg de sol. La moyenne sous serre (9.04 mg/kg) est un peu supérieure à celle au champ (8.25 mg/kg) mais reste dans la même gamme de concentrations

Sur ferrisol-nitisol, la teneur moyenne se situe à 3.52 mg/kg de sol, la moyenne du sol au champ (3.61 mg/kg) étant un peu inférieure à celle sous serre (3.91 mg/kg).

La parcelle de nitisol sur laquelle nous avons prélevé le sol du dispositif sous serre, se situe donc dans la même gamme de pollution (3-4 mg/kg) que la parcelle ferrisol du dispositif au champ, contrairement à ce que le résultat d'analyse sur lequel nous avons fondé notre choix laissait penser.

L'hétérogénéité est assez faible quels que soient le dispositif et le type de sol (Tableau 4).

Sur les 264 échantillons qui ont été analysés, un triplet d'échantillons fruit entier/peau/pulpe a été écarté pour les raisons expliquées paragraphe 2.2.1 « Expérimentations sur andosol ».

Une première analyse des 261 résultats de recherche de chlordécone retenus pour les échantillons de concombre (fruit entier, pulpe et peau) permet de constater, d'une part,

que tous les résultats sont positifs à la recherche de chlordécone et, d'autre part, que les concentrations en chlordécone dans les concombres présentent une très forte hétérogénéité.

Nous pouvons également comparer les résultats d'analyses des échantillons végétaux obtenus pour les différents dispositifs.

Type de sol et parcelles	Nombre	Moyenne	Min	Max	Écartype
Concombre	261	24,6	1,0	141,9	21,4
Andosol					
Ando2	24	21,0	1,8	52,3	12,8
Ser2	57	36,2	1,4	138,3	25,0
Ferri+Nitisol	180				
Ferri	120	13,7	3,0	34,7	7,2
Ser2	60	36,6	1,0	141,9	27,3
Total général	261	24,6	1,0	141,9	21,4

Tableau 5 : Concombre - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par parcelle ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

Les teneurs en chlordécone des échantillons végétaux s'échelonnent de $1 \mu\text{g}/\text{kg}$ à $141.9 \mu\text{g}/\text{kg}$. Si ces valeurs sont très élevées, rappelons que nous avons choisi de travailler sur des sols moyennement à très pollués afin d'avoir le maximum de résultats exploitables (concentrations supérieures à 0) et ainsi pouvoir étudier les caractéristiques des transferts, en particulier les transferts maximums. Pour les dispositifs sous serre (Ser2), que ce soit sur andosol ou nitisol, les moyennes et les concentrations maximales sont nettement supérieures à celles des dispositifs au champ (Ando2 et Ferri). Or les valeurs des teneurs en chlordécone du sol se situent dans la même gamme. **Il semble que les conditions d'expérimentation sous serre (sol fortement pollué en chlordécone, volume d'enracinement contraint et conditions climatiques) aient conduit à maximiser le transfert de chlordécone du sol vers les plants** et ce bien que le tuteurage ait empêché les transferts par contact. Les conditions de culture sous serre sont dites « forcées » par rapport aux conditions habituelles de culture.

D'autre part, on observe qu'au sein d'une même parcelle, les concentrations retrouvées dans les échantillons végétaux présentent une forte variabilité comme l'attestent les écarts-types. En effet, les valeurs des écarts-types de tous les dispositifs se situent entre 50% et 75% des teneurs moyennes. Ceci traduit une forte hétérogénéité de comportement des plants vis-à-vis du transfert (peut-être en fonction des conditions climatiques, du contact avec le sol, du stade de récolte...), indépendamment de l'hétérogénéité du sol qui est comparativement faible. Ces résultats nous conduisent à formuler l'hypothèse d'un transfert sol-plante présentant une forte variabilité.

Si l'on compare séparément les concentrations en chlordécone obtenues pour les différents compartiments végétaux (Tableau 6) : fruit entier (Fe), peau (Pe) et pulpe (Pu), on constate que la pulpe et le fruit entier affichent des valeurs de concentration moyenne très proches tandis que la peau est, en moyenne, 20 à 25% plus contaminée, tant sur andosol que sur ferrisol-nitisol.

	Moyenne	Nombre	Min	Max	Écartype
Concombre	24,8	261	1,0	141,9	21,4
Andosol	31,7	81	1,4	138,3	23,1
Fe	29,5	27	5,2	138,3	25,4
Pe	35,6	27	4,5	88,3	20,6
Pu	29,9	27	1,4	99,2	23,4
Ferrisol et Nitisol	21,4	180	1,0	141,9	19,9
Fe	19,3	60	1,4	72,0	17,0
Pe	25,4	60	1,0	141,9	23,8
Pu	19,4	60	1,3	83,6	17,9
Total général	24,6	261	1,0	141,9	21,4

Tableau 6 : Concombre - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et compartiment ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

Les résultats par compartiment ne suivant pas une distribution de loi normale (cf. annexe 9) et les échantillons étant appariés, nous avons eu recours à un test de Friedman et avons ensuite procédé à des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9).

Sur andosol, les résultats obtenus confirment une différence statistique de teneurs en chlordécone en peau et pulpe ($p\text{-value} = 0.029$).

Sur ferrisol-nitisol, nous obtenons des résultats comparables, avec un comportement statistiquement différent de la peau par rapport au fruit entier ($p\text{-value} = 0.001$) et à la pulpe ($p\text{-value} = 0.001$).

Par ailleurs, les compartiments présentent tous une très forte hétérogénéité de leur teneur en chlordécone : de 60% à 95%. D'une manière générale, les compartiments ont une variabilité de teneur en chlordécone plus importante sur ferrisol-nitisol (93%) que sur andosol (72%).

Il convient également de s'intéresser à la ventilation des concentrations en chlordécone dans les différents compartiments végétaux. Les tableaux 7 à 9 et les représentations graphiques correspondantes (Figure 14 à Figure 16) présentent la répartition des concentrations en chlordécone du fruit entier (Fe), de la peau (Pe) et de la pulpe (Pu). Au préalable, nous rappelons que, au champ comme sous serre, la concentration moyenne du sol est de 9,04 mg/kg de sol sec (SS) sur andosol, et 3,91 mg/kg SS sur ferrisol-nitisol. D'autre part, la teneur du sol en chlordécone présente une faible hétérogénéité quel que soit le type de sol ou de dispositif.

Résultats sur andosol et ferrisol-nitisol regroupés

Classes	Tout		
	Fe	Pe	Pu
/	87	87	87
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	67,8%	80,5%	70,1%
>20µg/kg	42,5%	52,9%	40,2%
>50µg/kg	9,2%	14,9%	10,3%

Tableau 7 : Concombre - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

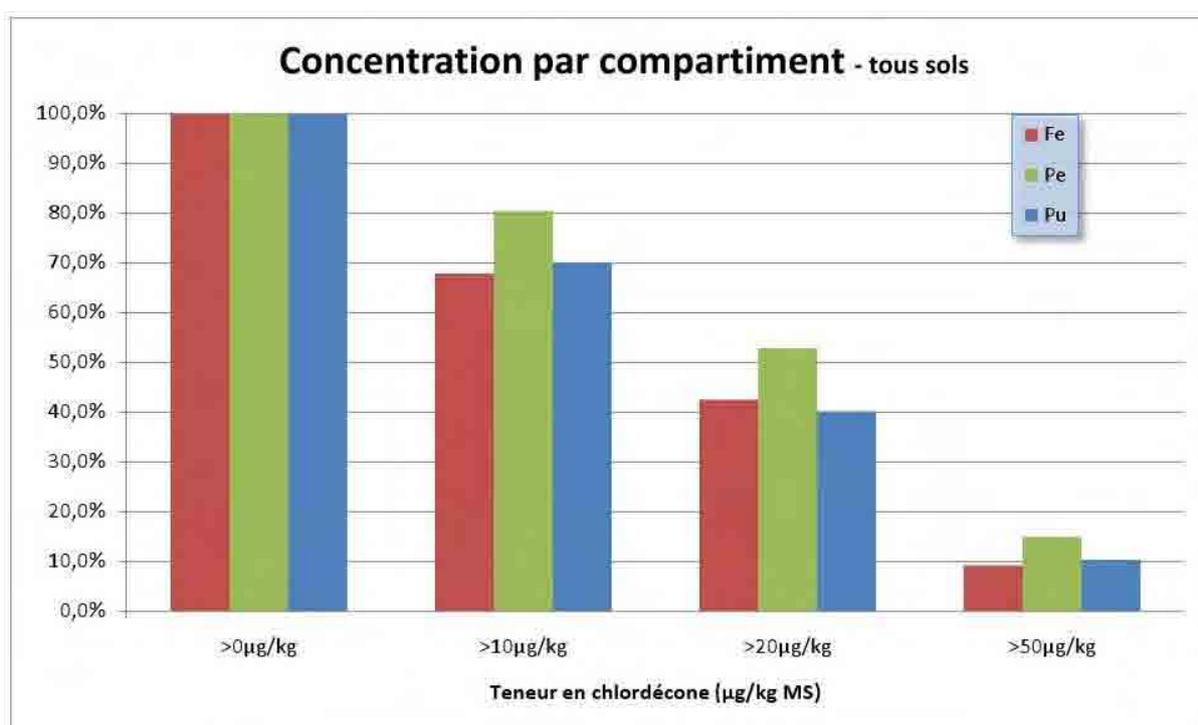


Figure 14: Concombre - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment (µg/kg MF)

Une lecture graphique suffit à montrer que tous les résultats de recherche de chlordécone dans les échantillons végétaux de l'essai sont positifs et que plus de 40% de ces échantillons sont non-conformes, c'est-à-dire que leur teneur en chlordécone est supérieure à la LMR de 20 µg/kg¹⁴. Notons que 10% environ des résultats sont supérieurs à la LMP¹⁵ fixée en 2005 à 50 µg/kg et depuis révisée.

¹⁴ Cf. 2.1.2 Taux de conformité

¹⁵ Limite Maximale provisoire de contamination des aliments

Résultats sur andosol seulement

Classes	andosol		
	Fe	Pe	Pu
/	27	27	27
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	85,2%	85,2%	88,9%
>20µg/kg	70,4%	74,1%	55,6%
>50µg/kg	11,1%	25,9%	14,8%

Tableau 8 : Concombre - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

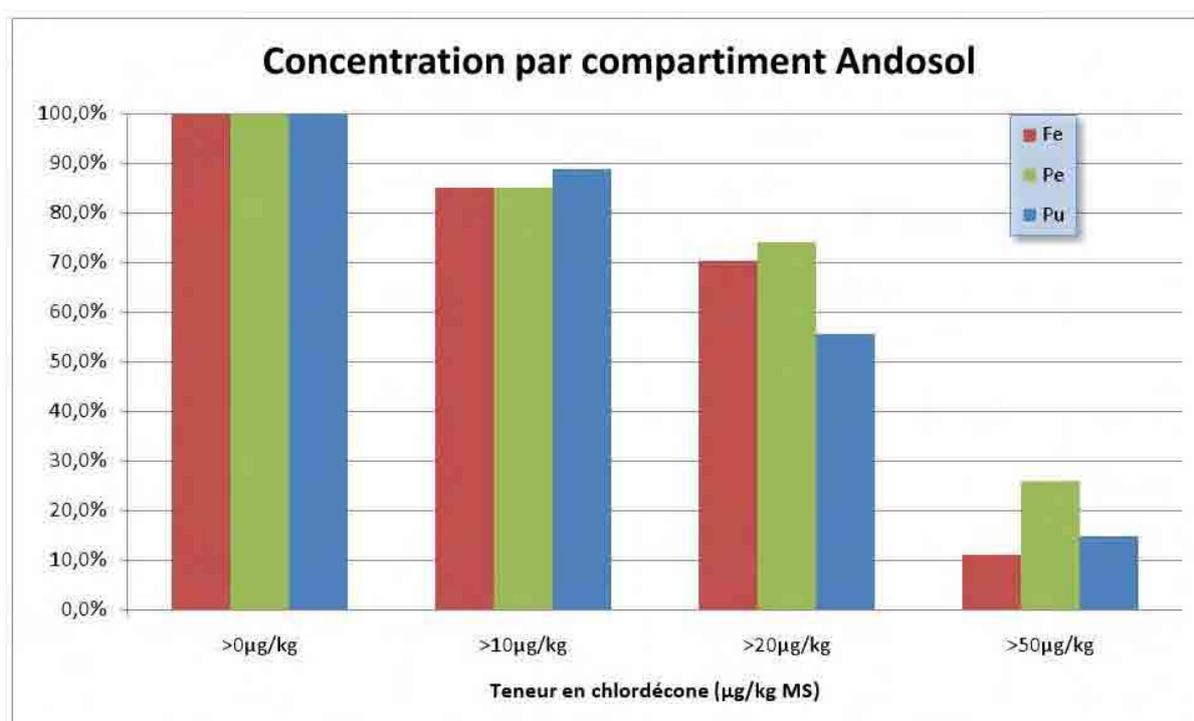


Figure 15 : Concombre - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Nous constatons que, sur andosol, 70% des fruits entiers sont contaminés au-delà de la LMR de 20µg/kg¹⁶ mais seulement plus de 10% sont contaminés au-delà de 50µg/kg. Ces résultats sont cohérents avec le fait que nous ayons travaillé sur un andosol très pollué (en moyenne 8,69 mg/kg) et que le concombre doit être considéré comme relativement sensible au transfert.

Il est à noter que 26% de la peau est contaminée à plus de 50 µg/kg, cette donnée est en faveur de l'épluchage afin de diminuer l'exposition du consommateur.

¹⁶ Cf. 2.1.2 Taux de conformité

Résultats sur ferrisol-nitisol seulement

Classes	nitisol et ferrisol		
	Fe	Pe	Pu
/	60	60	60
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	60,0%	78,3%	61,7%
>20µg/kg	30,0%	43,3%	33,3%
>50µg/kg	8,3%	10,0%	8,3%

Tableau 9 : Concombre - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur ferrisol-nitisol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

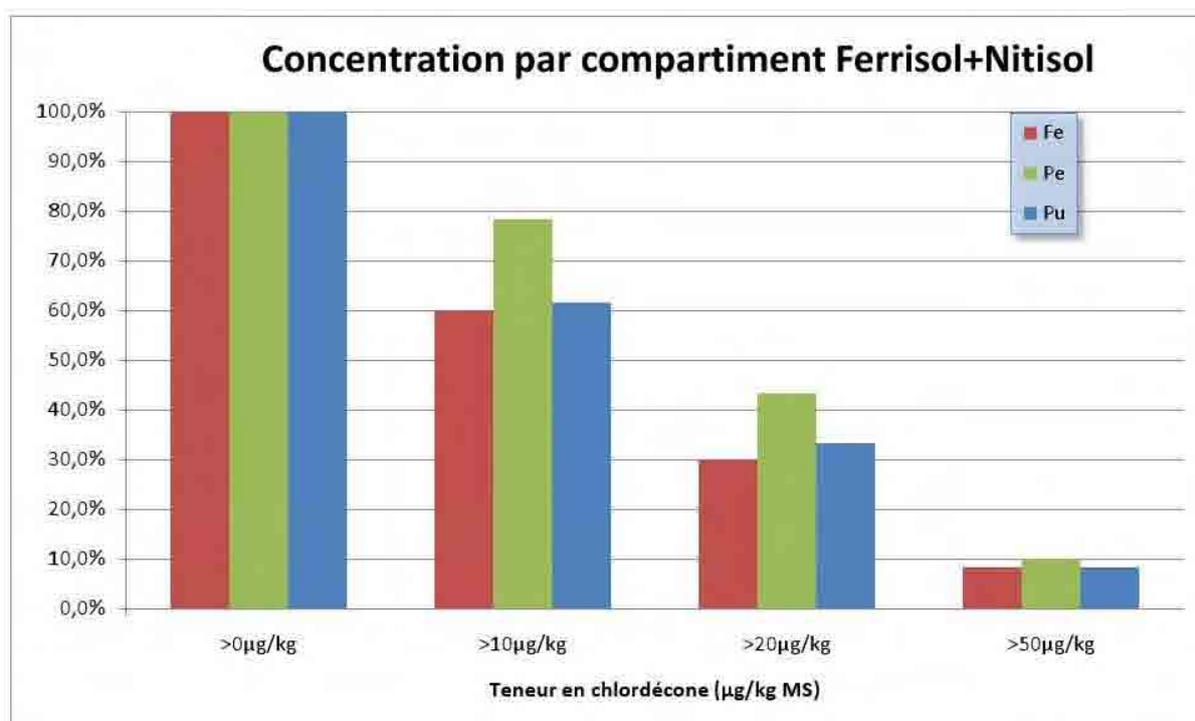


Figure 16: Concombre - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur ferrisol-nitisol (µg/kg MF)

Nous observons nettement moins d'échantillons non-conformes¹⁷ ou ayant une concentration supérieure à 50 µg/kg sur ferrisol-nitisol que sur andosol.

Il est cependant à noter que les niveaux de pollution des sols et la ventilation des effectifs entre résultats au champ et sous serre sont très différents pour andosol et ferrisol-nitisol. L'analyse de la relation sol/plante devrait nous éclairer sur la disponibilité de la chlordécone pour le concombre selon le type de sol.

¹⁷ Cf. 2.1.2 Taux de conformité

2.1.2 Taux de conformité

Tous les aliments destinés à la consommation humaine ou animale dans l'Union européenne (UE) sont soumis à une limite maximale de résidus de pesticides (LMR) dans leur composition, de manière à protéger la santé animale et humaine. La limite maximale de résidus est la concentration maximale du résidu d'un pesticide autorisée dans ou sur des denrées alimentaires ou des aliments pour animaux.¹⁸

Pour évaluer l'exposition chronique du consommateur, c'est-à-dire sur le long terme, et déterminer la valeur de la LMR, le principe de précaution est appliqué en élaborant des scénarios surestimant l'exposition. Les LMR sont fixées en tenant compte des habitudes alimentaires et correspondent à la teneur maximale de sécurité qui permet la consommation des denrées sans risque pour la santé.

En 2005, la Limite Maximale de Résidus pour la chlordécone a été fixée à 50 µg/kg pour les végétaux considérés comme potentiellement à risque¹⁹ et 200 µg/kg pour les autres (dans la plupart des végétaux²⁰ suite à l'avis rendu par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) le 9 septembre 2005 concernant deux projets d'arrêtés relatifs à la teneur maximale en chlordécone que doivent présenter certaines denrées d'origine végétale et d'origine animale pour être reconnues propres à la consommation humaine. Depuis, ces valeurs ont été révisées au vu des nouvelles données disponibles et validées au niveau international puisque la Commission européenne a retenu une LMR de 20 µg/kg pour les denrées cultivables sous climat tropical le 24 octobre 2007 et transposées en droit français par arrêté le 30 juin 2008²¹.

Tout au long de l'analyse des résultats obtenus dans le cadre de notre étude, nous utiliserons cette valeur de 20 µg de chlordécone par kg de produits végétaux qui constitue une référence dans le cadre de l'objectif de protection de la santé humaine du programme Jafa. Nous continuerons également à faire référence à la LMP de 50 µg/kg, considérée comme suffisamment protectrice pour la population par l'Anses en septembre 2007²² au vu des résultats des enquêtes de cohorte menées en Martinique et en Guadeloupe sur l'alimentation et le niveau de contamination des denrées.

Pour l'étude des taux de conformité obtenus, on s'intéresse plus particulièrement au fruit entier et à la pulpe. En effet, la peau n'étant que rarement consommée, on considère que la notion de conformité est moins pertinente pour ce compartiment.

	Type de sol	Compartiment		Conformité
Concombre	Andosol	Fe	8	29,6%
		Pu	12	44,4%
	Total Andosol		20	37,0%
	Ferrisol+Nitisol	Fe	42	70,0%
		Pu	40	66,7%
	Total Ferrisol+Nitisol		82	68,3%
Total Concombre			102	58,6%

Tableau 10: Concombre - Taux de conformité du fruit entier et de la pulpe par type de sol et compartiment

¹⁸ http://europa.eu/legislation_summaries/food_safety/plant_health_checks/121289_fr.htm

¹⁹ Carottes, concombres, dachines (madères), ignames, melons, patates douces, tomates

²⁰ Arrêté du 10 octobre 2005 relatif à la teneur maximale en chlordécone que ne doivent pas dépasser certaines denrées d'origine végétale pour être reconnues propres à la consommation humaine

²¹ Arrêté du 30 juin 2008 relatif aux limites maximales applicables aux résidus de chlordécone que ne doivent pas dépasser certaines denrées alimentaires d'origine végétale et animale pour être reconnues propres à la consommation humaine

²² Avis du 6 septembre 2007 de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'actualisation des données scientifiques sur la toxicité du chlordécone en vue d'une éventuelle révision des limites tolérables d'exposition proposées par l'Afssa en 2003

On constate que si, sur andosol, le taux de conformité de la pulpe est significativement supérieur à celui du fruit entier (44% pour la pulpe contre 30% pour le fruit entier), sur ferrisol-nitisol, les taux sont similaires (environ de 70%) au vu des incertitudes de valeurs liées à la mesure.

Sur andosol, le pourcentage de conformité est nettement inférieur à celui obtenu sur ferrisol-nitisol ce qui est cohérent avec la différence de taux de contamination des sols utilisés. La moyenne des teneurs en chlordécone des andosols est presque trois fois supérieure à celle de ferrisol-nitisol.

Il est possible de détailler ces résultats au champ et sous serre, toujours pour Fe et Pu uniquement.

Sol et compartiment	Conformité	
Concombre	102	58,6%
Andosol	20	37,0%
Champ	8	50,0%
Fe	3	37,5%
Pu	5	62,5%
Serre	12	31,6%
Fe	5	26,3%
Pu	7	36,8%
Ferrisol+Nitisol	82	68,3%
Champ	69	86,3%
Fe	34	85,0%
Pu	35	87,5%
Serre	13	32,5%
Fe	8	40,0%
Pu	5	25,0%

Tableau 11 : Concombre - Taux de conformité du fruit entier et de la pulpe par type de sol, mode de culture et compartiment

Dans le cas de l'andosol, si le taux de conformité est de plus de 50% au champ, il n'est que de 30% sous serre, or il s'agit du même sol. La comparaison entre les résultats obtenus au champ et sous serre permet donc de valider que les conditions de transfert sont plus extrêmes dans le dispositif sous serre qu'au champ, ce dernier correspondant aux conditions réelles en parcelle.

Sur andosol, la nette différence de conformité entre le fruit entier (37.5%) et la pulpe (62.5%) dans le cadre du dispositif au champ montre que retirer la peau diminuerait l'exposition du consommateur et suggère un rôle du transfert par contact dans la contamination préférentielle de la peau. La différence est moins marquée dans le cadre du dispositif sous serre, nous verrons pourquoi dans le cadre de l'analyses des résultats (Chapitre 2-2.2 : Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au fruit entier).

Sur ferrisol-nitisol, il n'y a pas de différence entre pulpe et fruit entier au champ. Nous ne tenons pas compte des résultats sous serre pour lesquels l'effectif est trop faible pour permettre de tirer des conclusions.

Par ailleurs, on constate que, au champ sur ferrisol avec un sol considéré comme moyennement pollué dans le cadre de cette étude (3,4 mg/kg), on obtient une conformité de plus de 85% tandis que, sous serre sur un nitisol similairement pollué, ce taux tombe à 40% pour le fruit entier et 25% pour la pulpe. Ceci tend à conforter les résultats obtenus sur andosol : **le dispositif sous serre maximise bien le transfert.**

2.1.3 Lecture graphique du taux de conformité

La Figure 17 explique la lecture graphique de la conformité pour les courbes de concentration de la pulpe par rapport à la concentration du fruit entier. Sur toutes les courbes de teneurs des échantillons végétaux en chlordécone qui seront présentées par la suite, la Limite Maximale de Résidus sera matérialisée par des segments de droites identiques à ceux du schéma.

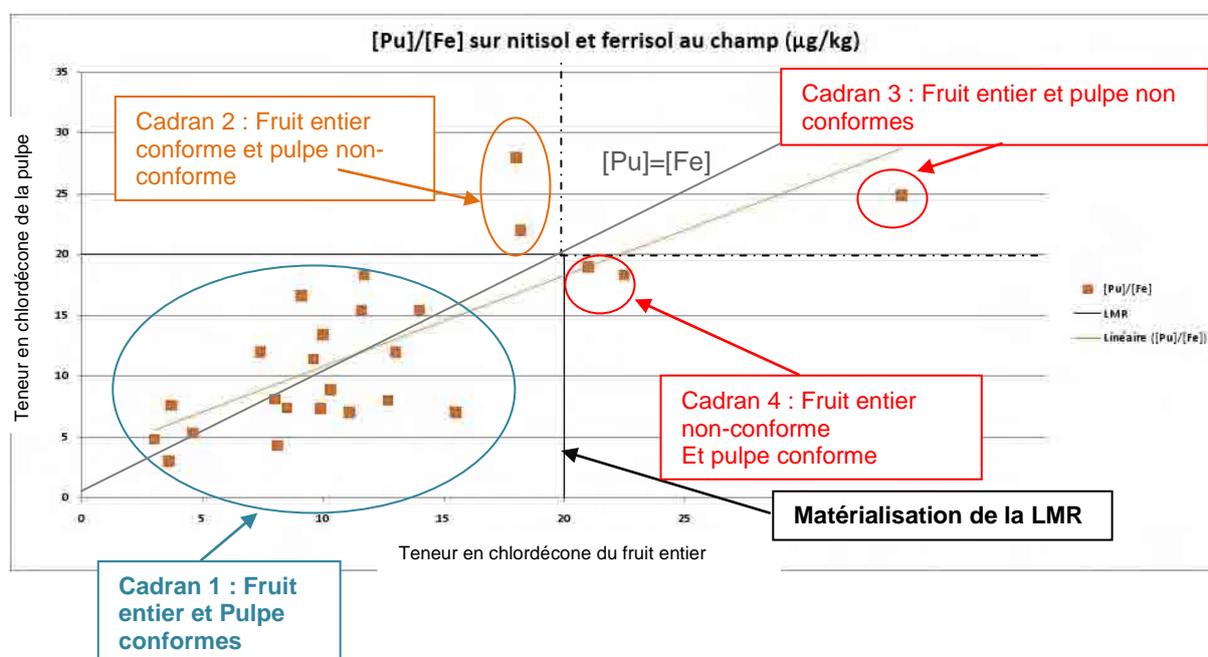


Figure 17 : Lecture graphique de la LMR

Ces premières interprétations de résultats nous permettent également de repérer les échantillons non cohérents pour nos analyses et d'en demander la ré-analyse au laboratoire. Il est à noter que, lorsque des points se situent dans le cadran 2, c'est le plus souvent dû à l'incertitude liée aux résultats d'analyse (20-30%). Dans notre exemple, on constate bien que les valeurs sont proches de la LMR tant pour la pulpe que pour le fruit entier : au vu de l'incertitude des mesures, les deux points du cadran 2 auraient pu se situer dans les cadrans 1 ou 3.

2.2 Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au fruit entier

La concentration en chlordécone dans le fruit entier, notée $[Fe]$, sert de référence à la comparaison avec la concentration dans la peau, notée $[Pe]$, d'une part, et dans la pulpe, notée $[Pu]$, d'autre part.

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux deux types de sol séparément avant de comparer l'ensemble des résultats.

2.2.1 Expérimentations sur andosol

Tout d'abord, nous ne dissocions pas les résultats obtenus dans le cadre des deux types de dispositifs mis en place, au champ et sous serre. Nous obtenons le graphique suivant, Figure 18 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol :

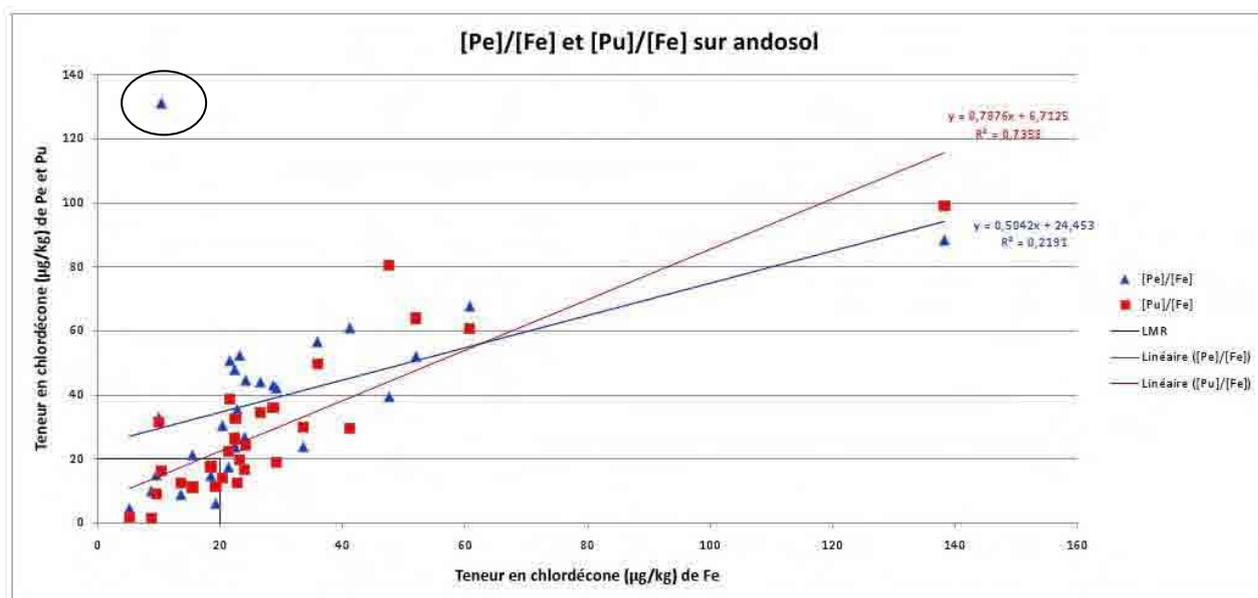


Figure 18 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol

On remarque qu'un point (entouré sur le graphique) se détache nettement des autres. Il fait partie des échantillons issus du dispositif au champ mais la teneur de la peau en chlordécone par rapport à celle du fruit entier est clairement inconsistante avec celles des autres échantillons. A cet échantillon (Jafa JP C10.1) correspondent les valeurs suivantes :

- Concentration du fruit entier = 10,4 µg/kg ;
- Concentration de la peau = 131,1 µg/kg ;
- Concentration de la pulpe = 16,2 µg/kg.

Contrairement à un autre triplet d'échantillons (Jafa Ser C10.1) pour lequel une deuxième puis une troisième extraction effectuées par le LDA26 ont conduit à des résultats nettement différents de ceux de la première extraction, pour le triplet Jafa JP C10.1, les résultats de la première extraction ont été confirmés. Le nombre de répétitions d'analyse de fruit entier, peau et pulpe sur concombre, nous permet de conclure que l'échantillon de peau a probablement été contaminé lors de sa préparation.

Après avoir supprimé le triplet de résultats d'analyse du fruit entier, de la peau et de la pulpe de Jafa Ser C10.1, nous obtenons de nouvelles courbes de [Pe]/[Fe] et [Pu]/[Fe] sur andosol (Figure 19).

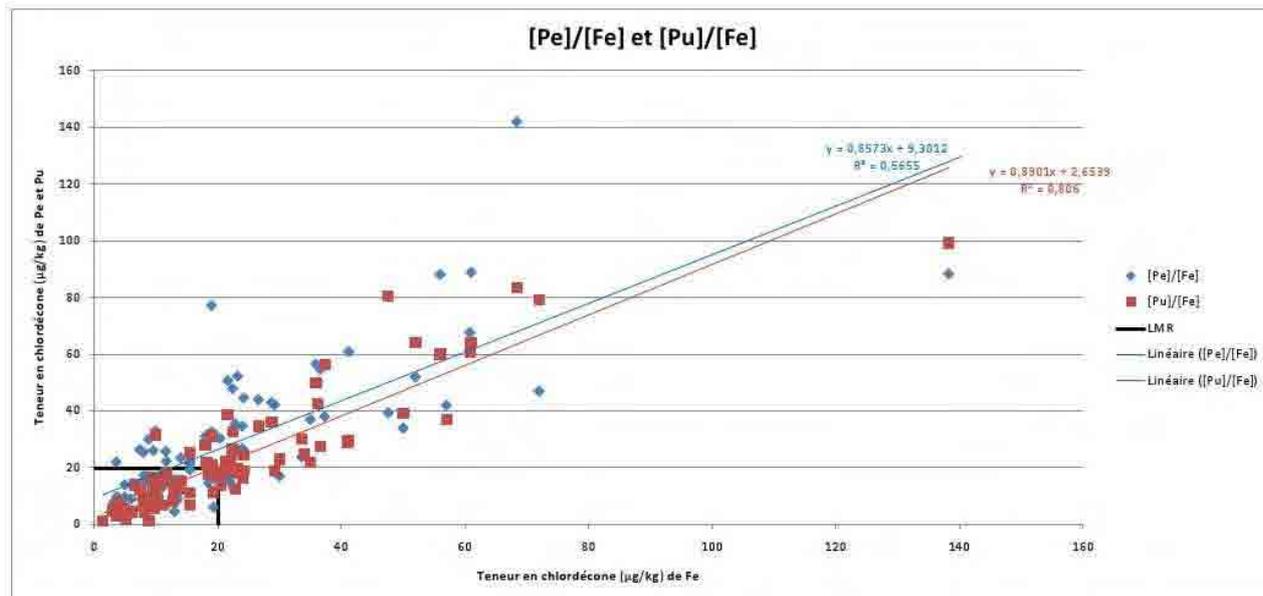


Figure 19 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol (correction de la valeur inconsistante)

On constate que la majorité des points se situent entre 0 et 60 µg/kg et que le comportement de la pulpe (courbe rouge Figure 19) et celui de la peau (courbe bleue Figure 19) sont similaires. Même si la peau tend proportionnellement à être très légèrement plus contaminée que la pulpe, l'écart n'est pas significatif.

La lecture graphique du taux de conformité permet de l'estimer moyen à faible (des points de part et d'autre de la LMR). La pente des deux courbes de tendance montre que plus le fruit entier est contaminé plus la pulpe et la peau sont contaminées. Afin d'affiner ces observations visuelles, nous allons nous baser sur deux valeurs statistiques : le coefficient de détermination (r^2) et le coefficient de corrélation (r).

Le coefficient de détermination (r^2) mesure la qualité de l'ajustement des données par rapport à la courbe de tendance, c'est-à-dire leur éparpillement et leur éloignement. Sa valeur peut être comprise entre 0 et 1. Plus sa valeur est proche de 1, meilleur est l'ajustement.

Sachant qu'il s'agit d'une expérimentation en milieu vivant et que le coefficient de détermination obtenu est de 0.57 pour la peau, on considère que les résultats sont assez hétérogènes et donc que la variabilité de la relation entre les concentrations de la peau et du fruit entier est moyenne. En revanche, avec un $r^2=0.8$, la relation entre les concentrations en chlordécone dans la pulpe et le fruit entier présente une bonne homogénéité.

Le coefficient de corrélation de Pearson (r) permet d'étudier l'existence d'une relation linéaire entre deux variables et l'intensité de cette liaison (degré de dépendance linéaire). L'utilisation de ce test est pertinente dans le cadre de cette étude car nous savons les corrélations être linéaires ou du moins linéarisables.

Les valeurs de ce coefficient se situent dans l'intervalle -1 à +1. Plus la valeur obtenue est proche des valeurs extrêmes -1 et 1, plus la corrélation entre les variables est forte. Une corrélation égale à 0 signifie que les variables sont linéairement indépendantes. Le signe + signifie que la relation entre les variables est proportionnelle ; quand l'une augmente (ou diminue), l'autre augmente (ou diminue). Le signe - signifie que la relation entre les variables est inversement proportionnelle ; quand l'une augmente (ou diminue), l'autre diminue (ou augmente).

Il est à noter que ce coefficient de corrélation est extrêmement sensible à la présence de valeurs aberrantes ou extrêmes dans l'ensemble de données.

Le test de Pearson révèle que les relations linéaires entre concentrations de la peau et du fruit ($r=0.76$) et entre concentrations de la pulpe et du fruit ($r=0.86$) sont fortes à très fortes. Pour plus de détails se référer à l'annexe 9 : Résultats des tests de corrélation.

Les valeurs d'équations et coefficients de détermination (r^2) des courbes de tendances et les résultats des tests de corrélation (r) obtenus pour les différentes modalités étudiées sont récapitulées dans le Tableau 12 au paragraphe « 2.2.4 Conclusions ».

Pour une analyse plus fine, nous nous intéressons maintenant à la différence de comportement au champ et sous serre.

Résultats sur andosol au champ (Figure 20)

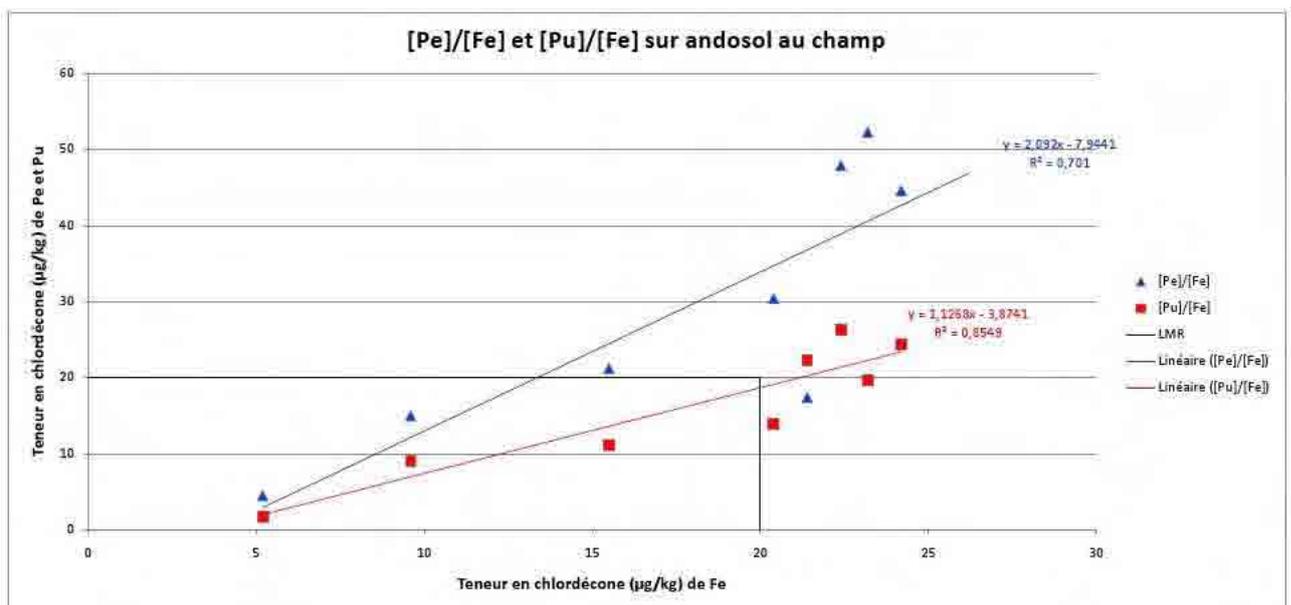


Figure 20 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol au champ

Peu de résultats sont conformes, ceci est cohérent avec le niveau de contamination fort de la parcelle (en moyenne 8,69 mg/kg de sol).

Les concentrations retrouvées dans la peau sont supérieures à celles retrouvées dans la pulpe qui n'excède jamais 30 µg/kg. Il est possible de supposer que le transfert par contact

augmente d'une manière générale la contamination du fruit en chlordécone et, plus particulièrement, du compartiment en contact direct avec le sol, la peau.

La variabilité des concentrations de la peau est plus importante que celle de la pulpe puisque le coefficient de détermination de la relation peau/fruit entier n'est que de 0.7 alors qu'il est de 0.85 pour pulpe/fruit entier. Le contact avec le sol induit probablement une augmentation de la variabilité de la concentration de la peau par rapport à celle du fruit entier. D'autre part, l'importance relative de la pulpe dans le fruit entier par rapport à celle de la peau est nettement supérieure, il semble donc logique que la relation pulpe-fruit entier soit plus homogène.

Les comportements de la peau et de la pulpe sont très fortement corrélés à celui du fruit entier puisque les coefficients de corrélation sont de 0.84 pour peau/fruit entier et de 0.93 pour pulpe/fruit entier²³.

Résultats sur andosol sous serre (Figure 21)

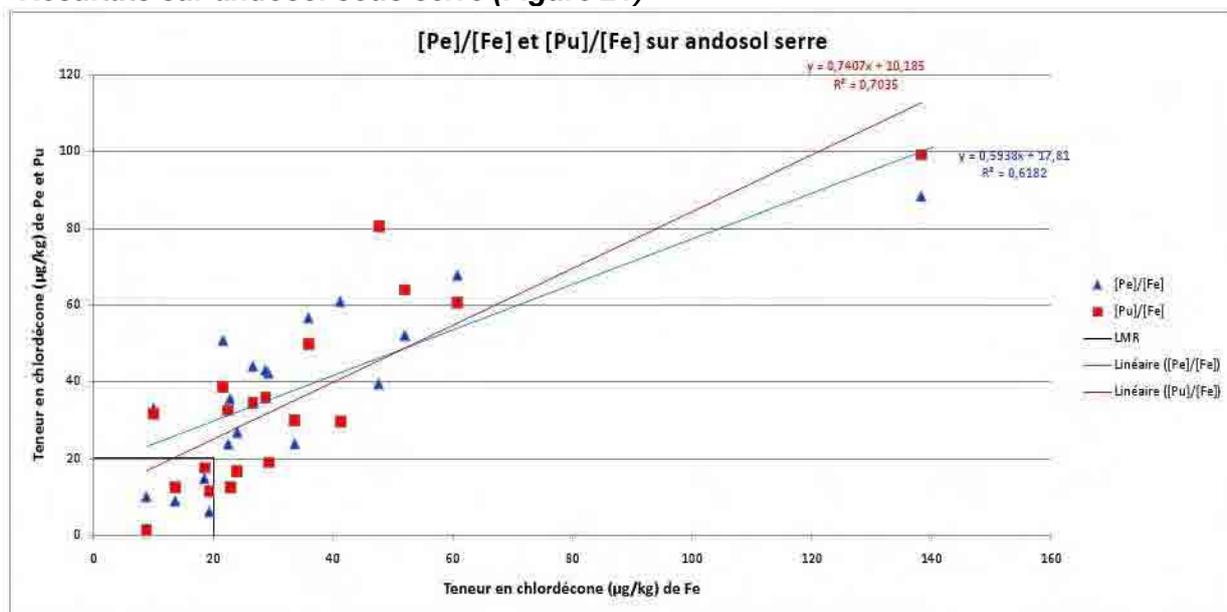


Figure 21 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol sous serre

La plupart des résultats obtenus sur andosol sous serre sont non-conformes or nous avons travaillé avec le même sol qu'au champ. Ces constatations sont en faveur de l'hypothèse d'un transfert forcé sous serre en raison des conditions de culture.

Les comportements de la peau et de la pulpe sont similaires ce qui révèle que la diffusion au sein du fruit est homogène.

Sachant que sous serre, les concombres étaient tuteurés et qu'il n'y a donc pas eu de transfert par contact, **le transfert par diffusion se ferait donc de façon homogène entre les différents compartiments.** Le transfert par contact ne serait pas la voie majoritaire de contamination.

Les coefficients de détermination autour de 0.6-0.7 pour les deux compartiments sont élevés, ce qui indique une bonne homogénéité de comportement.

Les coefficients de corrélation attestent d'une relation linéaire forte à très forte pour peau/fruit entier ($r=0.79$) et pulpe/fruit entier ($r=0.84$)²⁴.

²³ Pour plus de détails, cf. **Annexe 9** : Résultats des tests de corrélation

²⁴ Pour plus de détails, cf. **Annexe 9** : Résultats des tests de corrélation

Les résultats obtenus sous serre et au champ indiquent que le transfert par contact serait à l'origine d'hétérogénéité de comportement entre les organes (peau favorisée). Il pourrait également induire une hétérogénéité entre les plants (plus de variabilité).

Il est maintenant possible de comparer les comportements au champ et en serre, d'autant plus que les coefficients de détermination et de corrélation sont relativement élevés pour les deux dispositifs.

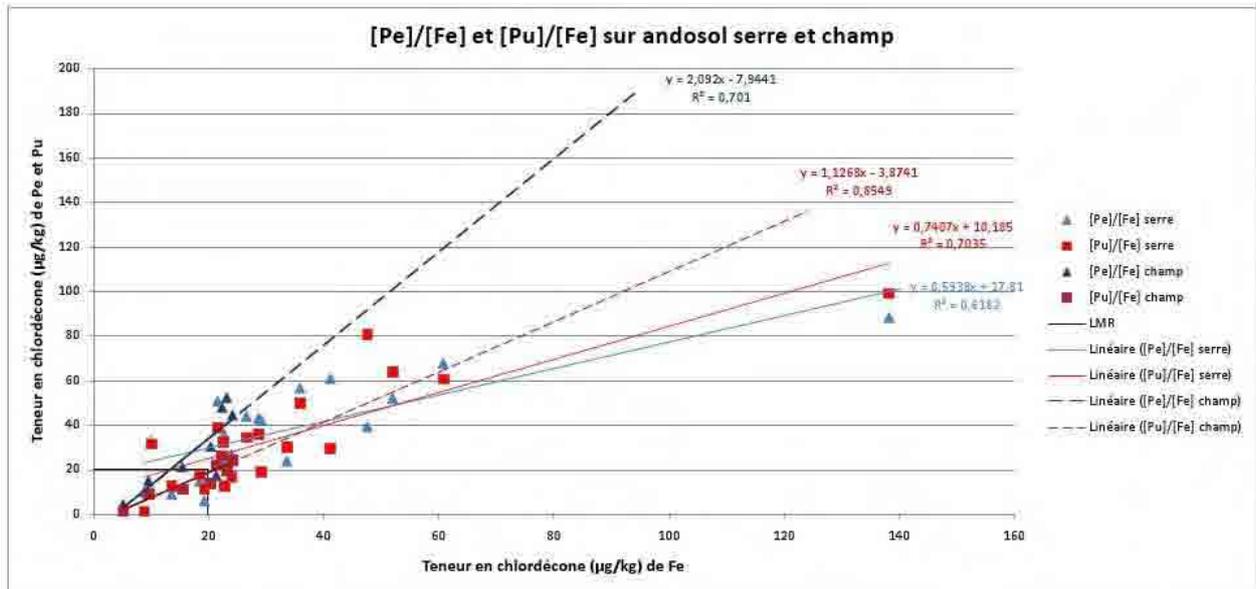


Figure 22 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol sous serre et au champ

Nous constatons que la pulpe (Figure 22, courbes rouges) présente une différence de comportement au champ et sous serre. La pente de la courbe de tendance de [Pu]/[Fe] est supérieure pour la situation au champ par rapport à celle sous serre (Figure 22, au champ, courbe rouge foncé dont la partie extrapolée, en pointillés, permet la comparaison avec la courbe sous serre en rouge vif), cependant l'ensemble des valeurs est plus faible et plus groupé. Les résultats d'analyses disponibles au champ sont très proches (points regroupés) ce qui introduit un biais important quant à la pente de la courbe et peut expliquer que la courbe de tendance au champ passe au dessus de celle sous serre au delà d'une concentration de 40µg/kg. La plupart des résultats que nous avons obtenus se situent en deçà de cette valeur, il faut donc veiller à ne pas se baser uniquement sur la courbe de tendance ou du moins sur sa partie extrapolée (Figure 22, courbe rouge en pointillés).

Concernant la peau au champ et sous serre (courbes bleues Figure 22), la différence de comportement est plus nette. La pente de [Pe]/[Fe] au champ est très nettement supérieure à celle de [Pe]/[Fe] sous serre, ce qui traduit un transfert privilégié vers la peau au champ par rapport à la serre. Il faut rappeler l'absence de transfert par contact sous serre en raison du tuteurage. **Ceci tendrait donc à montrer que le tuteurage limite bien la contamination de la peau.** Cependant le même phénomène que précédemment concernant l'extrapolation des courbes de tendance et leur pente, nous conduit à être prudents.

Sous serre, on remarque que [Pe]/[Fe] et [Pu]/[Fe] sont très proches, ce qui est cohérent avec les conditions de culture contrôlées et le confinement du système racinaire qui induit une optimisation des transferts.

2.2.2 Expérimentations sur nitisol-ferrisol

Comme pour l'andosol, nous allons tout d'abord étudier le comportement des différents compartiments sur ferrisol-nitisol, sans dissocier les résultats obtenus au champ et sous serre.

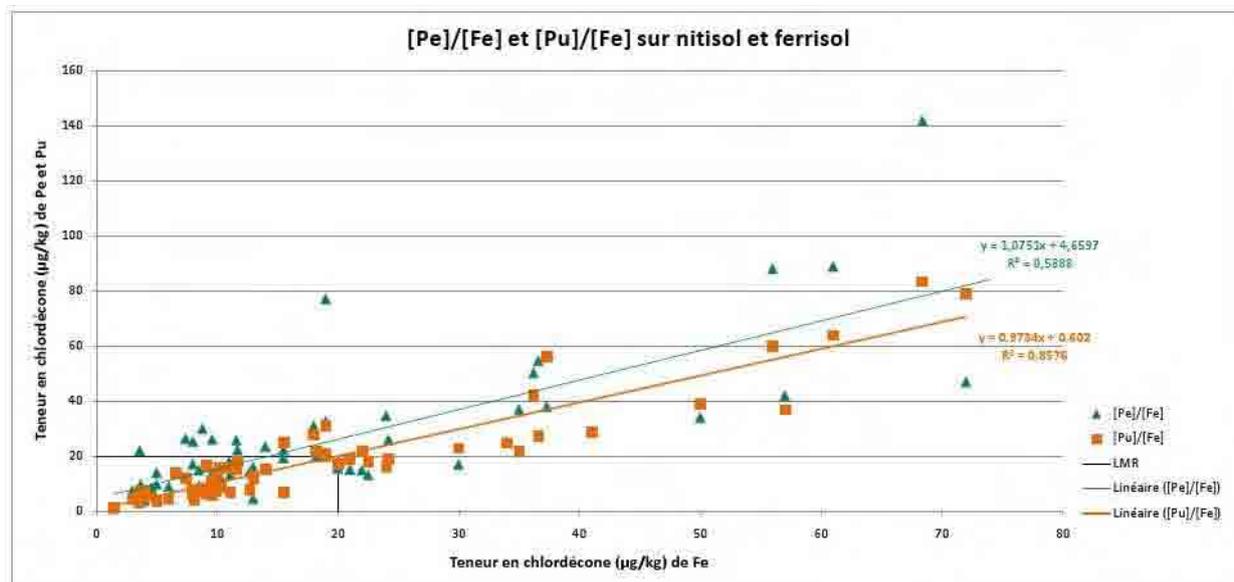


Figure 23 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur nitisol-ferrisol

L'interprétation du graphique (Figure 23) permet d'estimer que le taux de conformité est moyen et que peu de concentrations dépassent la valeur de 30 µg/kg.

Les comportements de la peau et de la pulpe ne diffèrent pas significativement mais la courbe de tendance de la peau est au dessus de celle de la pulpe ce qui reflète qu'elle tend à être plus contaminée. L'écart entre les deux courbes est de l'ordre de 10µg/kg, ce qui est assez faible au regard des différentes incertitudes.

Les résultats sont moyennement hétérogènes pour la peau ($r^2=0,59$) et peu hétérogènes pour la pulpe ($r^2=0,86$).

Les coefficients de corrélation sont bons à très bons tant pour la relation peau/fruit entier ($r=0,79$) que pour la relation pulpe/fruit entier ($r=0,84$)²⁵.

Pour une analyse plus fine, on s'intéresse maintenant à la différence de comportement au champ et sous serre.

²⁵ Pour plus de détails, cf. **Annexe 9** : Résultats des tests de corrélation

Résultats sur nitisol-ferrisol au champ (Figure 24)

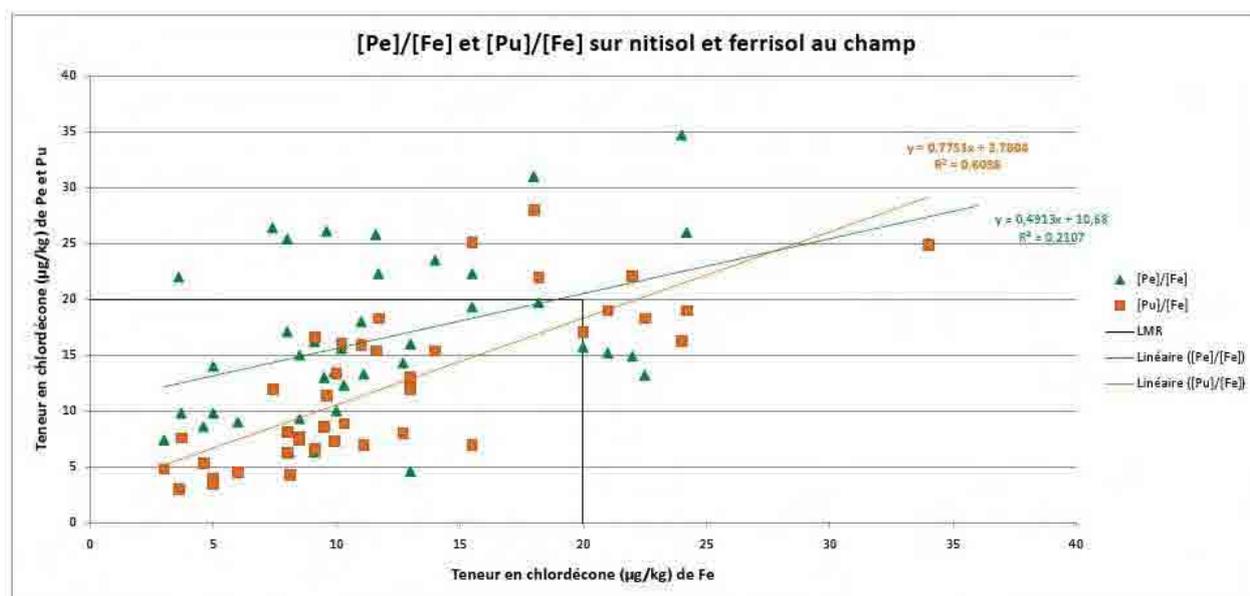


Figure 24 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur nitisol-ferrisol au champ

Beaucoup de résultats se situent dans la « zone de conformité » surtout pour la pulpe ce qui s'explique par la contamination en chlorthaloxone considérée comme moyenne de la parcelle (3.36 mg/kg en moyenne) pour un ferrisol.

Dans la zone pour laquelle nous disposons de la plupart des données (jusqu'à 25 µg/kg environ), la courbe de tendance de la concentration de la peau en chlorthaloxone par rapport à [Fe] se situe au dessus de celle de la pulpe par rapport à [Fe] ce qui correspond à une plus forte contamination de la peau que de la pulpe.

Cependant nous constatons une forte hétérogénéité des résultats concernant la peau. Celle-ci se traduit graphiquement par l'aspect « nuage de points » et statistiquement par le mauvais coefficient de détermination, proche de 0,2. Cette variabilité confirme l'hypothèse selon laquelle la contamination par contact induit une augmentation de l'hétérogénéité pour la peau. Le coefficient de détermination concernant la pulpe ($r^2=0,6$) est nettement supérieur à celui de la peau ce qui est cohérent avec les résultats obtenus sur andosol et les conclusions tirées.

Le coefficient de corrélation de la relation pulpe/fruit entier est bon ($r=0.78$) mais celui de peau/fruit entier n'est que moyen ($r=0.46$)²⁶. **L'effet d'hétérogénéité de la teneur de la peau induite par le transfert par contact au champ semble confirmé** dans ce cas-ci, d'autant plus que le nombre de répétitions (40) est statistiquement significatif.

²⁶ Pour plus de détails, cf. **Annexe 9** : Résultats des tests de corrélation

Résultats sur nitisol-ferrisol sous serre (Figure 25)

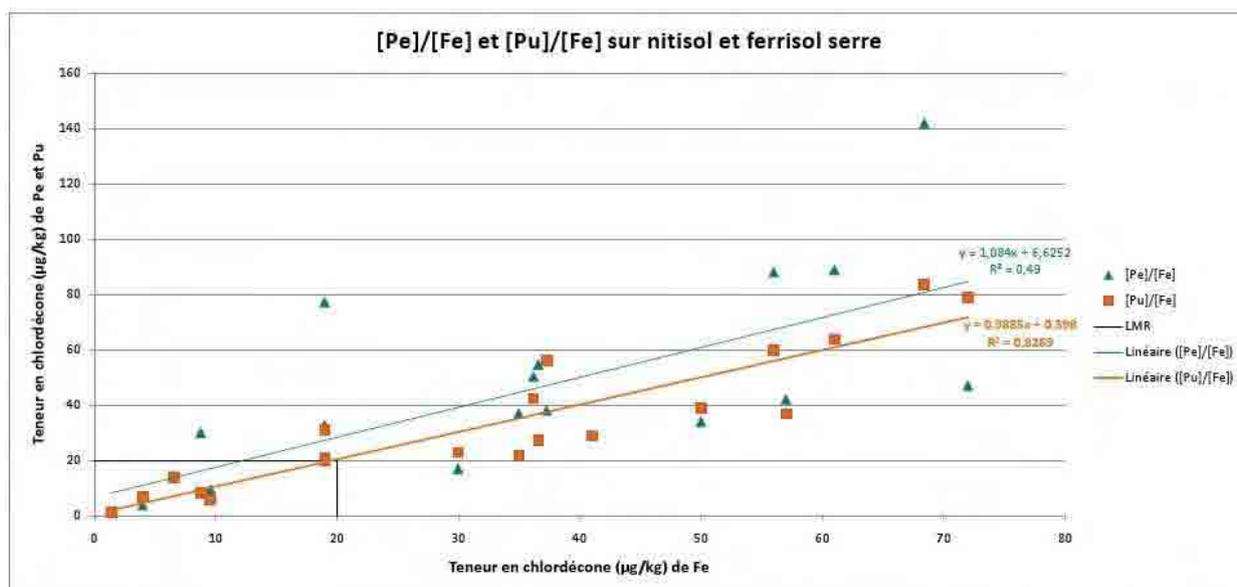


Figure 25 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur nitisol sous serre

Les comportements de la peau et de la pulpe ne diffèrent pas significativement mais la courbe de tendance de la peau est légèrement au dessus de celle de la pulpe ce qui reflète qu'elle tendrait à être plus contaminée. Cependant la très forte hétérogénéité des points [Pe]/[Fe] qui, graphiquement, sont épars et dont le coefficient de détermination de la courbe de tendance est de 0,26 ne permettent pas de tirer de conclusion. La pulpe, quant à elle, a un comportement plus homogène que la peau puisque le coefficient de détermination (r^2) est de 0.49.

Nous ne savons pas expliquer la relativement forte hétérogénéité de la relation [Pe]/[Fe] bien qu'il semble que, d'une manière générale, la variabilité des transferts soit plus importante sur ferrisol et nitisol que sur andosol (r^2 souvent inférieurs). D'autre part, la peau représente une fraction moins importante du fruit entier que la pulpe, il est donc normal que la relation pulpe/fruit entier soit moins hétérogène que celle peau/fruit entier.

Le coefficient de corrélation est bon pour peau/fruit entier ($r=0.7$) et très bon pour pulpe/fruit entier ($r=0.91$)²⁷.

²⁷ Pour plus de détails, cf. **Annexe 9** : Résultats des tests de corrélation

Il est maintenant possible de comparer les comportements au champ et sous serre pour les deux types de sol.

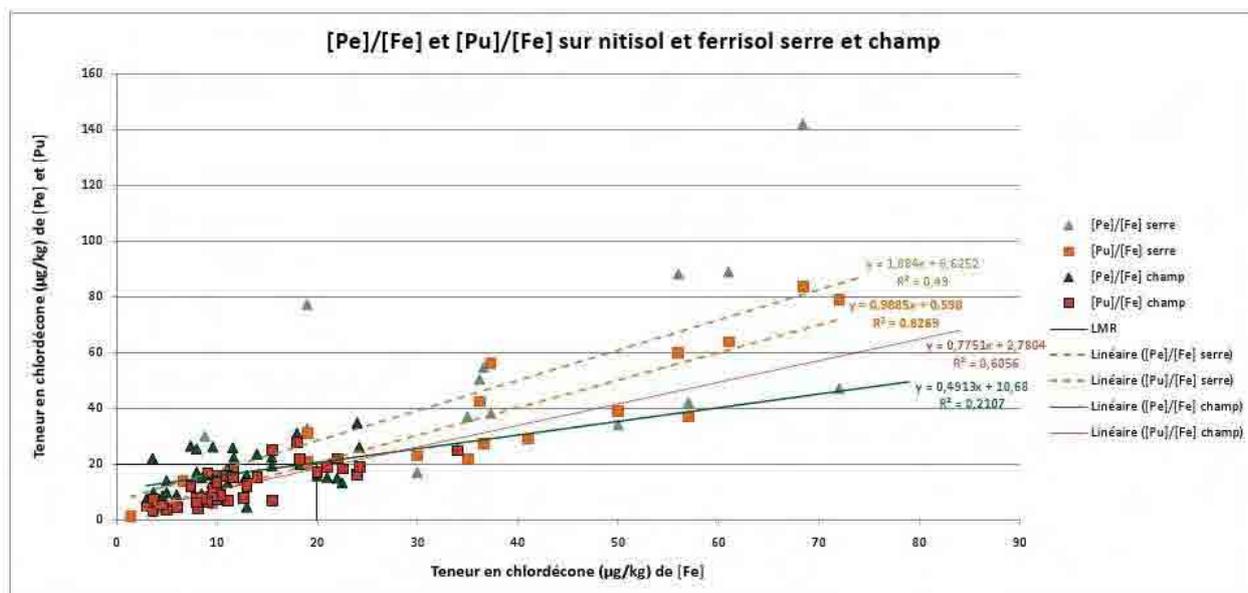


Figure 26 : Concombre - Concentration dans Pu par rapport à [Fe] sur nitisol-ferrisol au champ et sous serre

Nous constatons que les comportements de la peau et de la pulpe sous serre (Courbes en trait pointillé Figure 26) et au champ (Courbes en trait plein Figure 26) diffèrent. Les transferts sous serre, bien qu'uniquement par diffusion car les cultures étaient tuteurées donc sans contact avec le sol, sont plus importants qu'au champ. Les gammes de concentration des sols de ces deux dispositifs étant similaires (en moyenne, 3.36 mg/kg au champ et 3.91 mg/kg sous serre), on peut conclure que **les conditions dites « forcées » sous serre maximisent bien le transfert.**

A noter que les différences de pente au sein des grands types de dispositif rendent compte d'un comportement des compartiments similaires sous serre et différencié au champ.

L'hétérogénéité est plus forte au champ ($r^2=0.6$ pour la pulpe et $r^2=0.2$ pour la peau) que sous serre ($r^2=0.8$ pour la pulpe et $r^2=0.5$ pour la peau), ce qui serait en faveur de l'hypothèse d'une **augmentation de la variabilité au champ, probablement en raison de l'effet « contamination par contact » associé à l'hétérogénéité à très petite échelle de la répartition de la chlorthaloprop dans le sol.**

Pour mémoire, il est rappelé que, au champ, l'extrapolation des courbes de tendances au-delà d'une teneur du fruit entier en chlorthaloprop de 25 µg/kg n'est pas significative (cf. figure 24), c'est pourquoi nous ne commenterons pas le fait qu'au-delà de cette limite, les courbes de tendances se croisent et que le transfert vers la pulpe semble plus important que le transfert vers la peau. Cette impression est renforcée par la longueur de l'axe des abscisses qui va jusqu'à 90µg/kg afin d'intégrer les valeurs obtenues sous serre.

Les coefficients de corrélation révèlent que les teneurs entre ces différents compartiments sont liées par des relations linéaires fortes et ce de façon proportionnelle.

2.2.3 Comparaison andosol/ferrisol-nitisol

Pour finir cette partie sur les concentrations obtenues dans les différents compartiments, nous comparons les résultats obtenus sur andosol et ferrisol-nitisol. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la concentration de la pulpe par rapport à celle du fruit entier puisque la peau n'est pas consommée et que les coefficients de détermination et de corrélation étaient nettement moins bons.

Résultats pour la pulpe sur andosol et nitisol-ferrisol

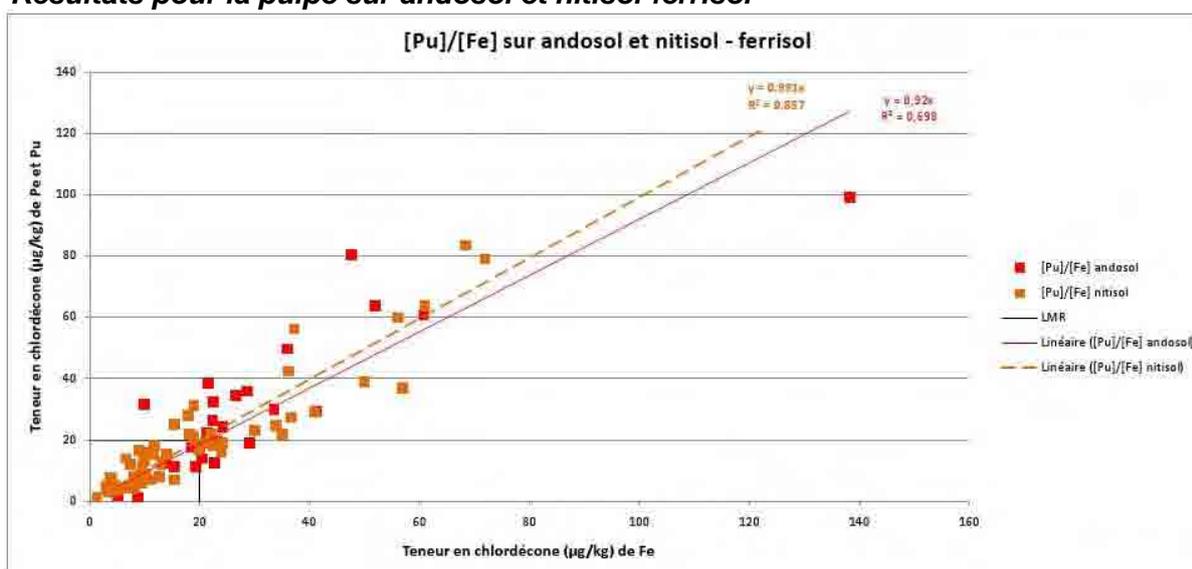


Figure 27 : Concombre - Concentration dans Pu par rapport à [Fe] sur andosol et nitisol-ferrisol

Les droites de tendance passant près de l'origine (0 ; 0), le choix a été fait de forcer leur passage par ce point. La comparaison des compartiments en est facilitée, sans pour autant dégrader significativement la représentativité de ces droites, les coefficients de détermination en étant peu affectés.

La Figure 27 montre que le comportement de la concentration de la pulpe par rapport à celle du fruit sur andosol (courbe rouge, Figure 27) est relativement similaire à celui observé sur nitisol-ferrisol (courbe orange, Figure 27). Les pentes des droites sont toutes deux très proches de 1, en effet, $y=0.99x$ sur ferrisol-nitisol et $y=0.92x$ sur andosol. **Nous obtenons donc en comportement moyen : [Pu] environ égale à [Fe], quel que soit le type de sol.** Ces observations sont cohérentes avec les résultats des tests statistiques (paragraphe 2.1.1, p.34).

Les coefficients de détermination sont très bons ($r^2=0.7$ sur andosol et $r^2=0.86$ sur ferrisol-nitisol) malgré l'intersection forcée par (0 ; 0). Les résultats sont donc relativement homogènes. Les coefficients de corrélation sont bons voire très bons, la relation entre concentration dans la pulpe et concentration dans le fruit entier est donc forte sur ferrisol-nitisol et très forte sur andosol.

De même, nous avons étudié les comportements de la peau sur andosol et sur ferrisol-nitisol. Les courbes de tendance ont des coefficients de détermination moyens et des coefficients de corrélation bons. Le fait de forcer les courbes par l'origine est sans impact sur la représentativité de la droite sur andosol mais sur ferrisol-nitisol, cela entraîne une nette dégradation du coefficient de détermination. Les ratios concentration dans la peau sur concentration dans le fruit entier sont proches de 1 sur andosol (0.96) et un peu supérieur sur ferrisol-nitisol (1.2). **Sur andosol, nous obtenons donc [Pe] environ égale à [Fe]. Sur**

ferrisol-nitisol, le transfert vers la peau serait légèrement favorisé comparé au fruit entier, nous aurions donc la relation donc $[Pe] > [Fe]$. Les résultats de l'analyse statistique présentée en 2.1.1 (p.34) confirment ces observations y compris la différence statistique entre concentrations dans la peau et dans le fruit entier sur ferrisol-nitisol.

Une fois la molécule adsorbée par le végétal, sa diffusion au sein des organes est donc bien indépendante du type de sol. D'autre part, on constate qu'elle s'effectue de manière comparable au sein de différents plants de concombre (faible hétérogénéité de la réponse de la plante).

Résultats pour la peau et la pulpe, tous types de sol et dispositifs confondus

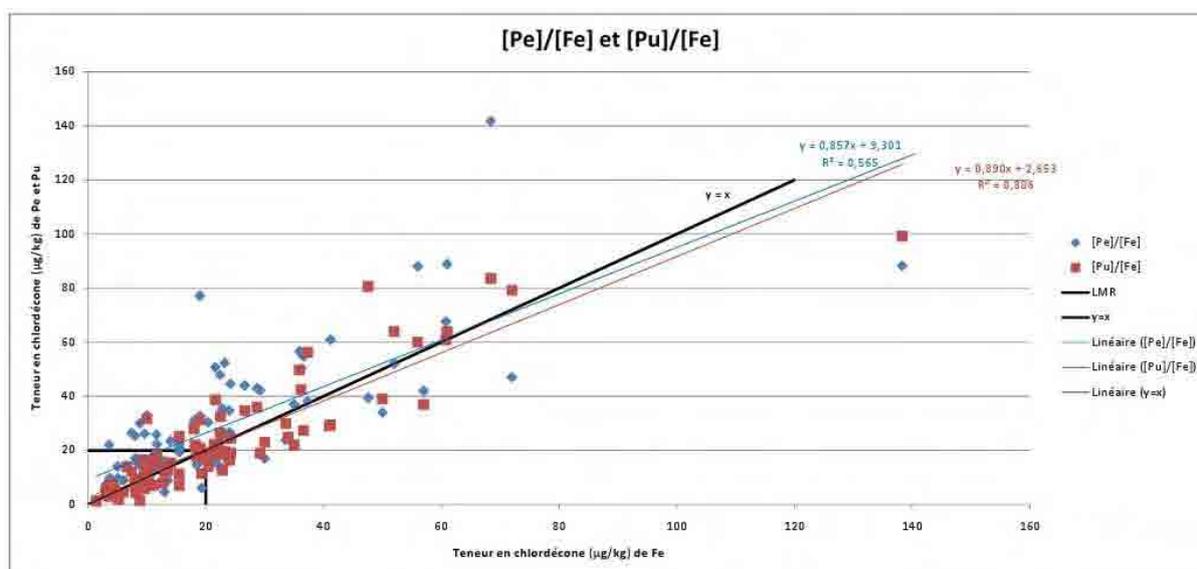


Figure 28 : Concombre - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] tous types de sol et dispositifs confondus

Les coefficients de détermination obtenus, 0.6 et 0.8 sont satisfaisants même si la relation $[Pe]/[Fe]$ est plus hétérogène que celle $[Pu]/[Fe]$, ce qui traduit la plus grande variabilité des transferts vers la peau, tout particulièrement au champ. Les coefficients de corrélation, quant à eux, sont bon pour peau/fruit entier ($r=0.75$) et très bon pour pulpe/fruit entier ($r=0.90$)²⁸. D'autre part, nous constatons que les droites de tendances sont toutes deux très proche de la droite $y=x$. En moyenne, les teneurs dans la pulpe et la peau, tous types de sols et dispositifs confondus, sont donc proches de la teneur dans le fruit entier.

Tous types de sol et dispositifs confondus, les concentrations de la peau et de la pulpe sont donc bien proportionnelles à celle du fruit entier. En moyenne, les teneurs dans le fruit entier, dans la peau et dans la pulpe sont proches. Il n'apparaît pas de différence significative de contamination entre le fruit entier, d'une part, et la peau ou la pulpe, d'autre part. La répartition de la chlorthalopate s'effectue donc de manière relativement homogène au sein du fruit.

²⁸ Pour plus de détails, cf. **Annexe 9** : Résultats des tests de corrélation

Afin de confirmer qu'il existe également une relation entre concentration dans la pulpe et dans la peau, nous avons étudié rapidement les données sur andosol et ferrisol-nitisol (Figure 29). De plus, nous pourrions ainsi voir s'il existe une différence plus marquée entre peau et pulpe qu'entre le fruit entier et les deux autres compartiments.

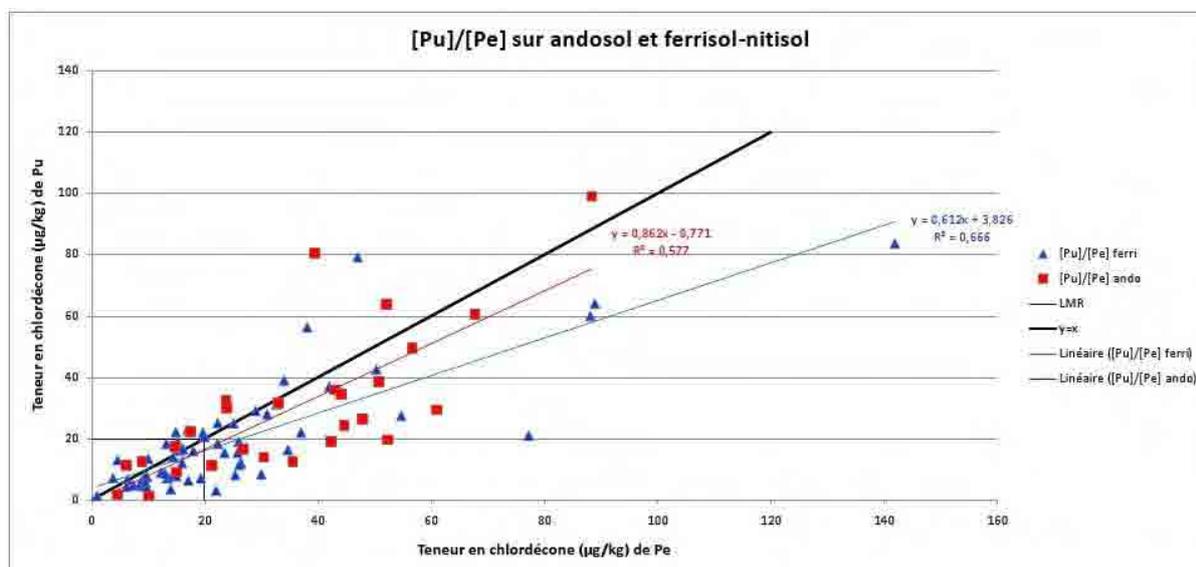


Figure 29 : Concombre - Concentration dans Pu par rapport à concentration dans Pe sur andosol et ferrisol-nitisol

Globalement, une tendance identique est observée lorsqu'on compare la concentration dans la pulpe à la concentration dans la peau avec cependant une forte hétérogénéité pour les valeurs élevées. La corrélation entre les concentrations des deux compartiments est bonne voire très bonne ($r=0.79$)²⁹. La relation de proportionnalité est donc confirmée.

Nous constatons également que les deux droites de tendance sont situées sous la droite $y=x$, **la peau tendrait donc à être légèrement plus contaminée que la pulpe**, en particulier sur ferrisol-nitisol où l'écart est plus net.

Les résultats de l'analyse statistique des teneurs en chlordécone dans les trois compartiments ont mis en exergue une différence de comportement entre la peau et de pulpe que ce soit sur andosol ($p\text{-value} = 0.029$) ou sur ferrisol-nitisol ($p\text{-value} = 0.001$). Ce qui conforte les constatations précédentes.

²⁹ Pour plus de détails, cf. **Annexe 9** : Résultats des tests de corrélation

2.2.4 Conclusions

Il est possible de synthétiser ces résultats à l'aide des équations de courbes de tendance (sans passage forcé par l'origine) et des coefficients de détermination et de corrélation correspondants (Tableau 12).

Modalité étudiée	Comp.	Equation	R ²	R
Andosol	Pe	$y = 0,6197x + 17,287$	0,5816	0.76
	Pu	$y = 0,7891x + 6,6209$	0,7326	0.86
Andosol au champ	Pe	$y = 2,092x - 7,9441$	0,701	0.84
	Pu	$y = 1,1268x - 3,8741$	0,8549	0.93
Andosol sous serre	Pe	$y = 0,5938x + 17,81$	0,6182	0.79
	Pu	$y = 0,7407x + 10,185$	0,7035	0.84
Nitisol-ferrisol	Pe	$y = 1,0751x + 4,6597$	0,5888	0.79
	Pu	$y = 0,9734x + 0,602$	0,8576	0.84
Nitisol-ferrisol au champ	Pe	$y = 0,4913x + 10,68$	0,2107	0.46
	Pu	$y = 0,7751x + 2,7804$	0,6056	0.78
Nitisol-ferrisol sous serre	Pe	$y = 1,084x + 6,6252$	0,49	0.7
	Pu	$y = 0,9885x + 0,598$	0,8269	0.91
Tous sols confondus	Pe	$y = 0,8573x + 9,3012$	0,5655	0.75
	Pu	$y = 0,8901x + 2,6539$	0,806	0.90

Tableau 12: Concombre - Equations et coefficients de détermination (r²) et de corrélation (r) des courbes de tendances pour [Pe]/[Fe] et [Pu]/[Fe] selon les différentes modalités étudiées

Si le coefficient de détermination est très mauvais pour la peau au champ, les autres r² sont moyens à très bons.

Nous constatons que **l'hétérogénéité est globalement un peu plus faible sur andosol** ce qui pourrait s'expliquer par la disponibilité de la chlrodécone dans ces sols et les mécanismes de transfert.

La relation pulpe-fruit entier a un comportement nettement plus homogène que la relation peau-fruit entier. Sur nitisol-ferrisol, cette différence est plus marquée. Sur ce type de sols, la concentration de la peau présente donc une variabilité plus importante de son comportement vis-à-vis de la concentration du fruit entier.

D'une manière générale, **la relation entre la concentration en chlrodécone de la pulpe et celle du fruit entier est donc toujours plus homogène que celle entre la peau et le fruit entier**, et ce quel que soit les modalités étudiées. De même, les coefficients de détermination sont globalement meilleurs pour les résultats obtenus sous serre.

En ce qui concerne les coefficients de corrélation, au vu des valeurs obtenues dans les différents dispositifs, **la relation linéaire proportionnelle entre la concentration en chlrodécone des différents compartiments est confirmée.**

Les bonnes corrélations obtenues pour la plupart des modalités permettent de conclure que :

- Les concentrations en chlordécone des différents compartiments sont proportionnelles ;
- il n'y a pas de différence marquée de transfert vers la peau et la pulpe, les transferts de chlordécone au sein du fruit sont donc homogènes ;
- les transferts sur les deux types de sols étudiés paraissent avoir des comportements relativement similaires ;
- le transfert au champ présente un comportement plus variable en ce qui concerne la peau ;
- les conditions de culture sous serre, dans le cadre de ces essais, ont conduit à favoriser les transferts sol-plante (ce point sera étudié plus en détail dans la partie 2.3 Transferts sol-plante).

Le mode de préparation ne semble pas modifier significativement l'exposition potentielle du consommateur. Cependant, les tests statistiques (cf. annexe 9) ont permis de démontrer qu'il existe une différence de moyenne de contamination entre la peau et la pulpe, **la peau étant plus contaminée en moyenne que la pulpe**, quel que soit le type de sol.

L'épluchage reste donc à conseiller, assorti d'un lavage minutieux permettant de diminuer les risques de contamination par la terre résiduelle située sur la peau (contact avec le sol) ou transférée (mains ou contenant pour le transport souillés). En préalable, il est également important d'éviter les contaminations lors des manipulations liées à la récolte et au stockage.

L'hypothèse d'un transfert préférentiel par contact ne semble pas être vérifiée au vu des résultats obtenus. En l'état de nos connaissances actuelles, la pratique du paillage ou du tuteurage ne peut constituer une préconisation de mode de culture même si elle reste une piste à confirmer. En effet, si le transfert par contact n'est semble-t-il pas le mode de transfert privilégié, il n'en reste pas moins une voie de contamination. Au vu du biais introduit par les conditions forcées sous serre, les dispositifs mis en place dans le cadre de ces essais ne permettent pas d'étudier l'impact du tuteurage ou du paillage sur les transferts de chlordécone et les teneurs dans les différents compartiments.

2.3 Transferts sol-plante

2.3.1 Notion de risque et lecture graphique (Figure 30)

La courbe de tendance correspond à une probabilité de 50% que les points se situent sous la courbe. Pour une concentration donnée du sol en chlordécone, les probabilités sont les mêmes que la concentration dans le fruit, soit inférieure soit supérieure à celle correspondant à la courbe.

La courbe transfert maximum correspond, dans le cadre de cet essai, à une probabilité de 100% que les points se situent en dessous, c'est-à-dire que, pour une concentration donnée du sol en chlordécone, la concentration dans le fruit soit inférieure ou égale à celle correspondant à la courbe. Le risque de se situer au-delà de ces valeurs est théoriquement nul.

Pour tracer cette courbe, nous choisissons un alignement de points caractérisés par un très fort taux de transfert (rapport teneur dans le végétal/ teneur dans sol maximum).

La zone à laquelle il conviendrait de s'intéresser tout particulièrement est celle située entre la LMR et la courbe de transfert maximum car c'est dans cet intervalle que l'on retrouve les fruits non-conformes et donc le risque pour les consommateurs (zone grisée, Figure 30).

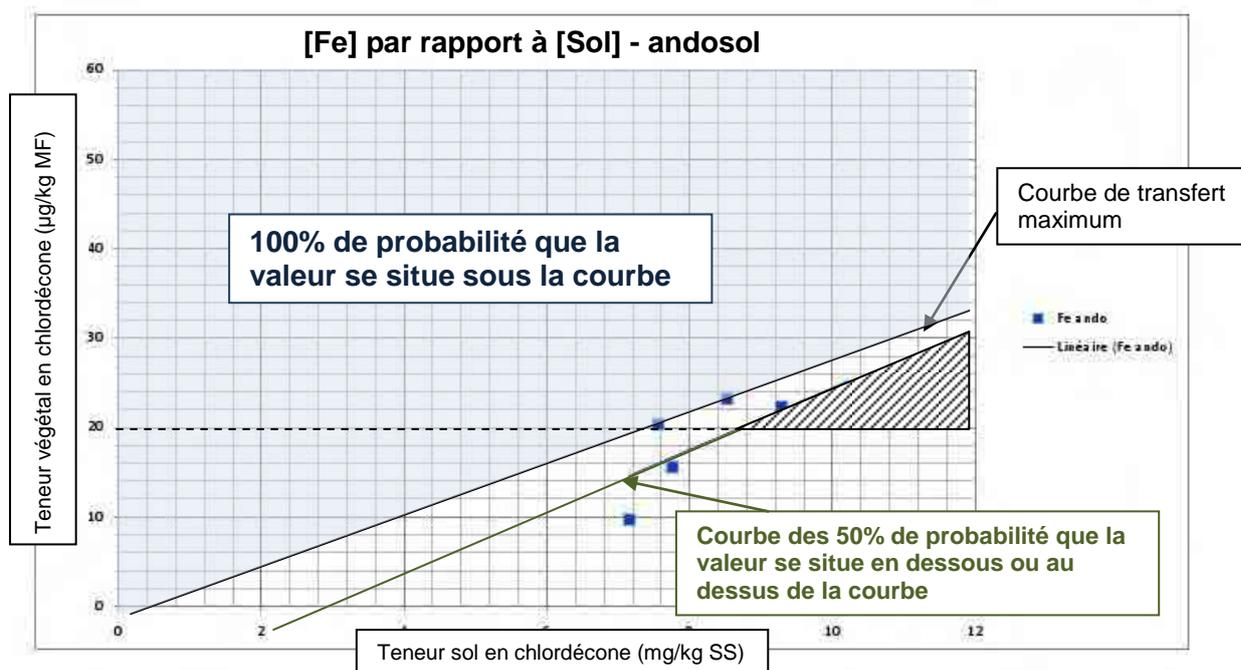


Figure 30 : Lecture graphique du risque

A l'aide des graphiques précédemment décrits, nous allons tout d'abord étudier le transfert sol-plante séparément sur chaque type de sol puis nous effectuerons une comparaison.

2.3.2 Expérimentations sur andosol

Nous nous intéressons en premier lieu au transfert sol-plante, c'est-à-dire à la relation entre la concentration de chaque compartiment végétal en chlordécone et celle du sol sur lequel la plante a poussé. C'est avec le fruit entier, référence légale en termes de Limite Maximale des Résidus, que nous commençons.

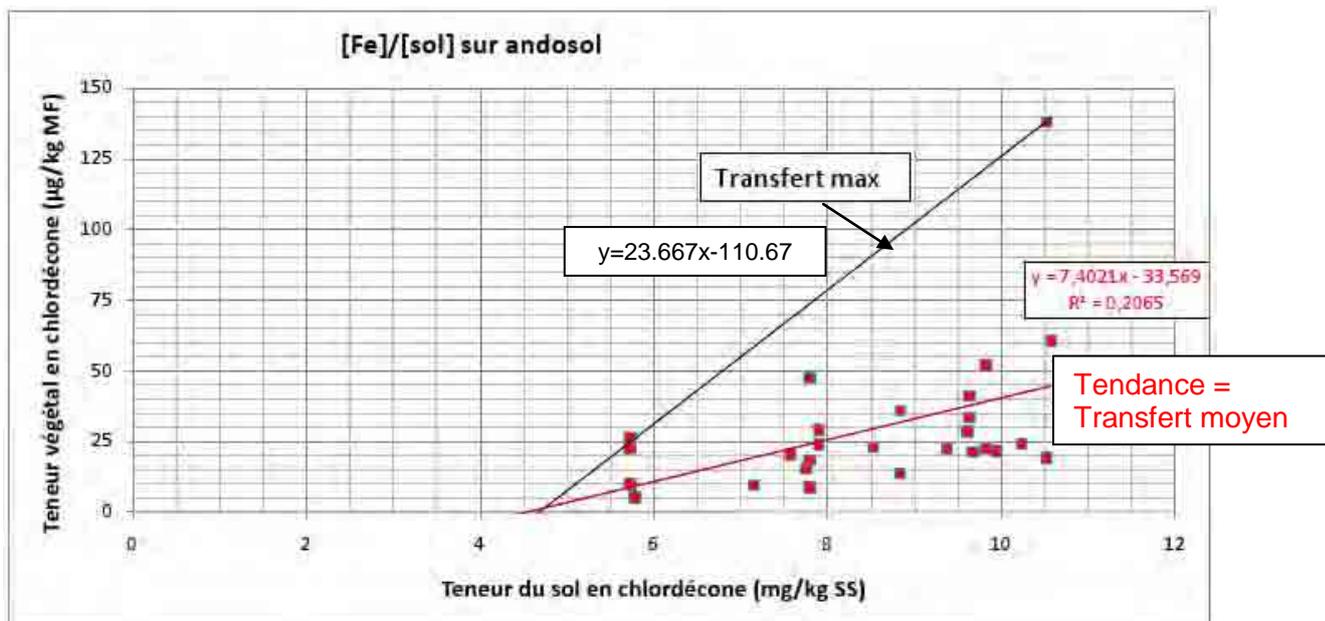


Figure 31 : Concombre - [Fe]/[sol] sur andosol

La courbe de tendance (en rouge, Figure 31) représente le transfert moyen. Lorsque les points à étudier sont suffisamment ajustés, il est possible de la tracer afin d'avoir une courbe de comparaison avec le transfert maximum (courbe noire).

Concernant le transfert de chlordécone du sol vers le fruit entier, nous pouvons observer que la courbe du transfert max est nettement au dessus de la courbe de tendance. Le transfert maximum observé est donc nettement supérieur au transfert moyen observé, le rapport est de l'ordre d'un facteur trois.

A noter que le faible coefficient de détermination ($r^2=0.21$) du rapport [Fe]/[sol] dénote une forte hétérogénéité de transfert. Cependant la lecture du graphique montre que plus le sol est pollué plus le fruit tend à être pollué. Il y a donc une proportionnalité entre les deux concentrations malgré une très forte variabilité de comportement selon les plants. Cette proportionnalité est confirmée par le coefficient de corrélation, $r=0.45$, reflet d'une relation linéaire d'intensité moyenne.

De plus, au-delà d'une teneur en chlordécone du sol de 4.5 mg/kg, le risque d'obtenir des fruits contaminés est non nul et au-delà de 5.5 mg/kg, il apparait un risque de non-conformité (cf. 2.3.6 figure 43 : Détermination graphique de la concentration maximale du sol pour laquelle on obtient 100% de conformité du fruit). Cette valeur de pollution du sol est une valeur très élevée. Il serait intéressant de mettre en regard la proportion des parcelles situées sur andosol et concernées par un tel niveau de contamination.

Nous nous intéressons maintenant de la même manière à la concentration en chlordécone de la peau.

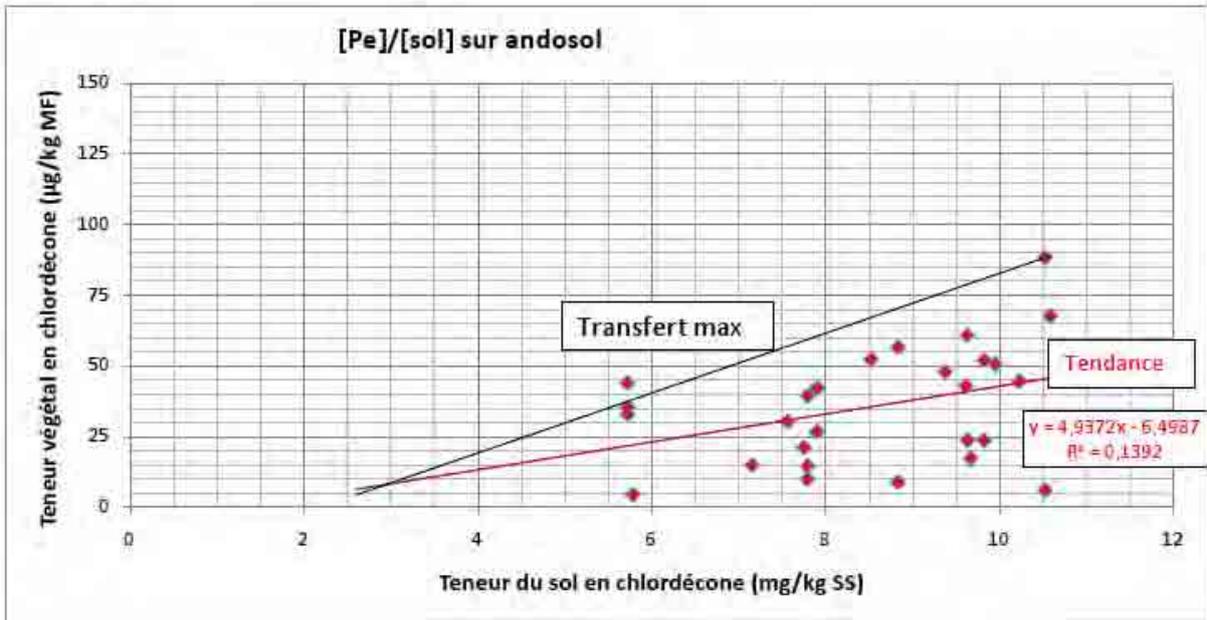


Figure 32 : Concombre - [Pe]/[sol] sur andosol

Pour le transfert de chlordécone du sol vers la peau, l'hétérogénéité des résultats ($r^2=0.14$ Figure 32) est encore plus forte que dans le fruit entier. Cependant, la proportionnalité entre la concentration dans le sol et la concentration dans la peau reste visible.

Nous notons que, au-delà d'une teneur en chlordécone du sol de 2.5 mg/kg, le risque d'obtenir des peaux contaminées est non nul et qu'au-delà de 4 mg/kg, il y a un risque de non conformité. Ces valeurs seuil de teneur du sol en chlordécone sont inférieures à celles du fruit entier ce qui est en faveur du transfert maximum plus important vers la peau.

Dans le cas de la relation entre les teneurs observées dans le sol et dans la peau, le coefficient de détermination ($r^2=0.14$) est très mauvais et le coefficient de détermination ($r=0.38$) ne permet pas d'affirmer qu'il existe une relation linéarisable entre les deux variables.

De même que pour la peau, nous étudions le transfert du sol vers la pulpe.

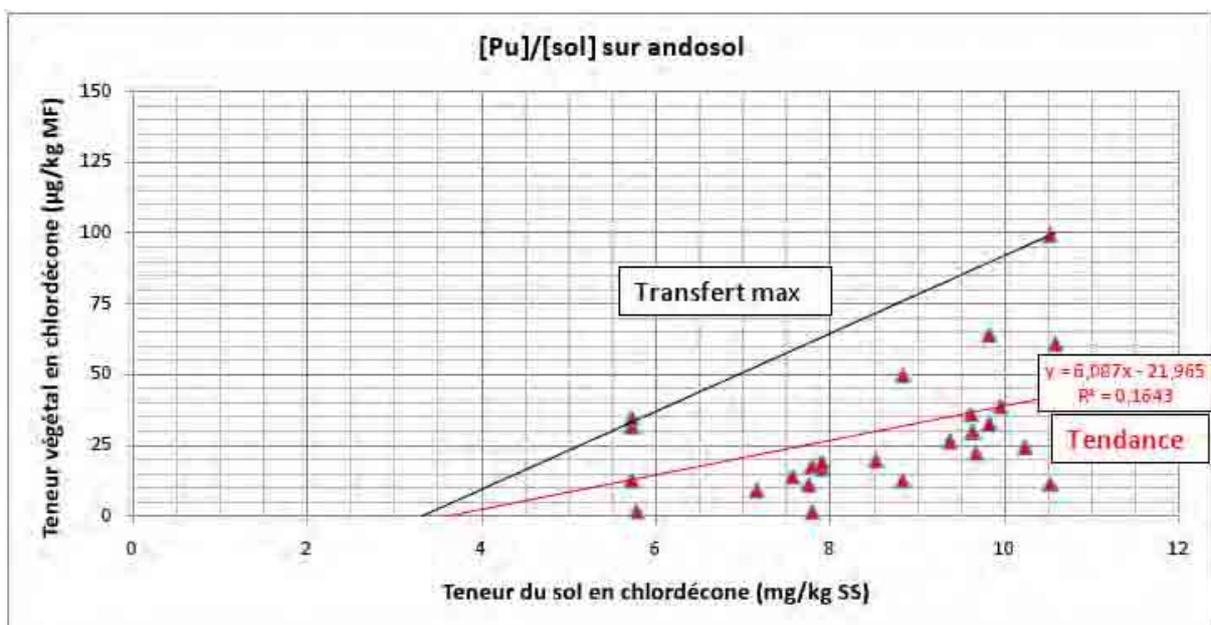


Figure 33 : Concombre - [Pu]/[sol] sur andosol

Pour la courbe de transfert maximum (Figure 33, courbe noire), nous observons que, jusqu'à une teneur en chlordécone du sol de 3.4 mg/kg, il n'y a pas de risque d'obtenir de la pulpe contaminée. Concernant le risque de non-conformité, il apparaît pour des concentrations du sol de 4.8 mg/kg.

Une fois de plus le coefficient de détermination est très mauvais ($r^2=0.16$). Le coefficient de détermination ($r=0.4$), quant à lui, permet de dire qu'il existe une relation linéarisable d'intensité moyenne entre les deux variables.

La comparaison avec le fruit entier sera effectuée grâce à la Figure 34 sur laquelle le transfert maximum de chaque compartiment est représenté.

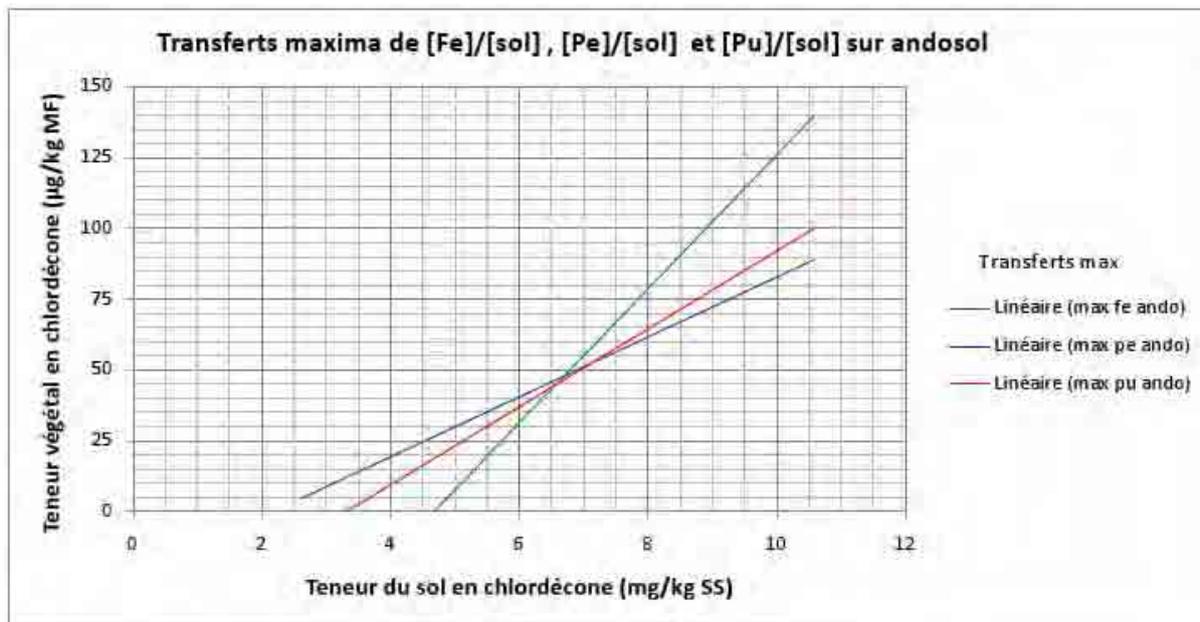


Figure 34 : Concombre - Transferts maxima de [Fe]/[sol], [Pe]/[sol] et [Pu]/[sol] sur andosol

Globalement, il est intéressant de constater que le transfert est très similaire pour les courbes concernant la peau (courbe bleue Figure 34) et la pulpe (courbe rouge Figure 34). Pour le fruit (courbe verte Figure 34), la pente plus accentuée du transfert maximum vient de l'intégration d'une valeur extrême, (10,52 ; 138.3) néanmoins elle suit la même tendance que les deux autres.

On peut également étudier séparément les transferts maxima au champ et sous serre

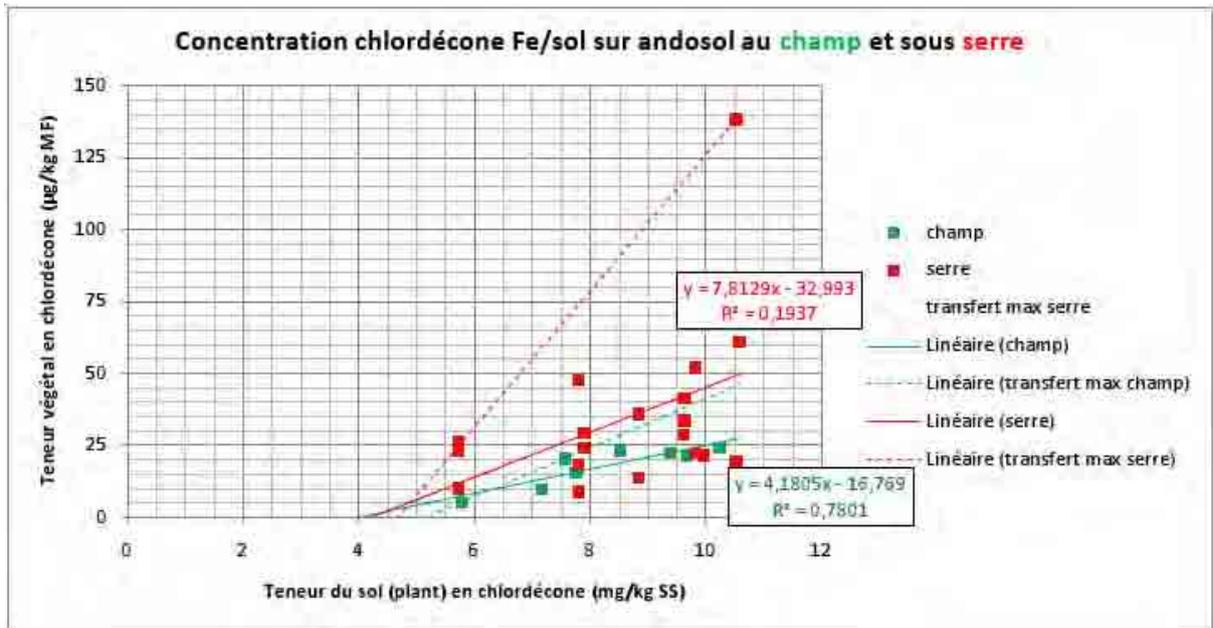


Figure 35 : Concombre - [Fe]/[sol] sur andosol au champ et sous serre

La courbe du transfert maximum sol-plante sous serre (courbe rouge en pointillés Figure 35) est très nettement au-dessus de celle du transfert maximum sol-plante au champ (courbe verte en pointillés Figure 35) ; la pente est environ deux fois plus importante. En rappelant qu'il s'agit du même sol pour les deux dispositifs, on constate donc qu'à concentration de chlordécone égale dans le sol, les fruits sont nettement plus contaminés sous serre qu'au champ. L'hypothèse du transfert maximisé dans les conditions de l'essai sous serre est donc validée.

C'est donc sous serre que nous obtenons les seuils de concentration du sol les plus bas pour le risque de fruit entier contaminé et pour le risque de non-conformité.

Nous remarquons que si sous serre le coefficient de détermination est mauvais ($r^2=0.19$), reflet d'une forte hétérogénéité du transfert sol-plante ; au champ, le coefficient de détermination est bon ($r^2=0.78$) donc la relation est plus homogène. En outre, le coefficient de corrélation sol-plante au champ ($r=0.88$) révèle que la relation linéaire entre concentrations dans le sol et dans le fruit entier est très forte. Le coefficient de corrélation ($r=0.44$) ne permet pas d'affirmer qu'il existe une relation linéarisable entre la teneur du sol en chlordécone et celle du fruit entier sous serre.

2.3.3 Expérimentations sur nitisol-ferrisol

Nous nous intéressons maintenant au transfert du sol vers la plante sur ferrisol-nitisol. Nous commençons par l'étude de la relation entre la concentration du fruit entier et la teneur du sol en chlordécone.

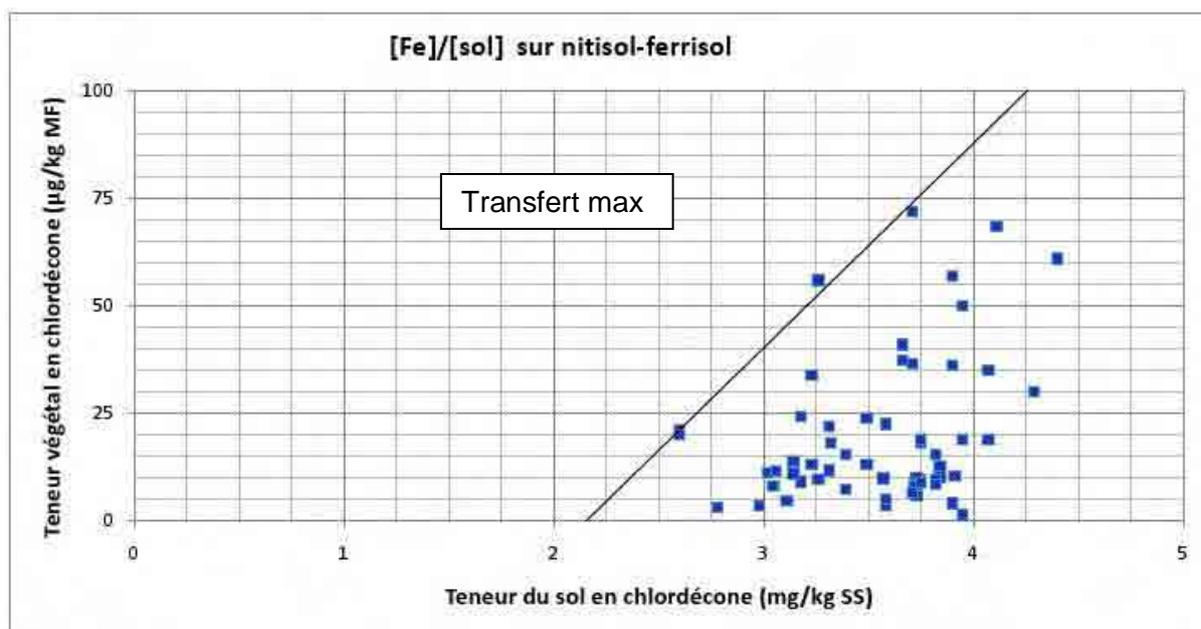


Figure 36 : Concombre - [Fe]/[sol] sur nitisol-ferrisol

Concernant le transfert de chlordécone du sol vers le fruit entier sur nitisol-ferrisol, il existe bien un transfert maximum au comportement nettement distinct du transfert moyen (Figure 36).

A noter que la forte hétérogénéité du transfert et la faible dispersion des teneurs dans le sol des résultats obtenus n'ont pas permis d'obtenir une courbe de tendance représentative. De même, le coefficient de corrélation ($r=0.32$) montre que la relation linéaire entre les deux valeurs serait moyennement forte. Ceci étant vrai pour les deux autres compartiments, nous ne n'indiquerons plus les coefficients de corrélation dans la suite de cette partie. Néanmoins la lecture du graphique montre que plus le sol est pollué plus le fruit tend à être pollué bien que la tendance soit moins nette que sur andosol. On verra plus tard que les gammes de concentration du sol en chlordécone au champ et sous serre étant identiques, le transfert maximisé obtenu sous serre conduit graphiquement à une superposition des résultats : pour une même concentration de sol, on a deux groupes de concentration dans le fruit, l'un correspondant au champ, l'autre à la serre, avec une forte variabilité de la réponse de la plante.

Nous constatons que le risque d'obtenir des fruits entiers contaminés est non nul au-delà d'une teneur du sol en chlordécone de 2.2 mg/kg. La valeur seuil du risque de non-conformité est quant à elle de 2.6 mg/kg.

Nous nous intéressons maintenant de la même manière à la concentration en chlordécone de la peau.

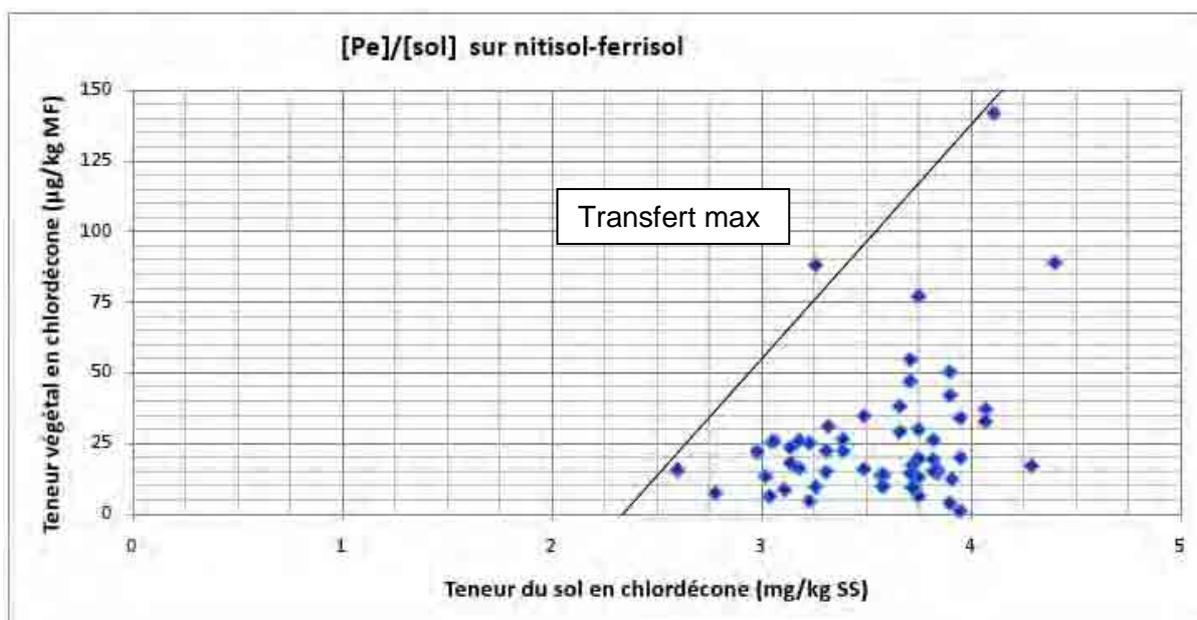


Figure 37 : Concombre - [Pe]/[sol] sur nitisol-ferrisol

Comme pour le fruit entier, la répartition des résultats obtenus ne permet pas d'obtenir une courbe de tendance significative (Figure 37). La proportionnalité entre la concentration dans la peau et la teneur du sol est visible même si, comme pour le fruit entier, elle est moins nette que sur andosol, tout particulièrement pour les concentrations en chlordécone de la pulpe inférieures à 25 µg/kg.

En revanche, les points sur la courbe de transfert maximum se détachent clairement du groupe de points du transfert moyen. Le comportement est donc significativement différent.

La concentration seuil du sol en chlordécone pour laquelle il existe un risque d'avoir des pulpes contaminées est de 2.3 mg/kg. Le risque de non-conformité se situe au-delà d'une concentration en chlordécone du sol de 2.6 mg/kg. Tout comme pour le fruit entier, la pente de la courbe de transfert maximum étant très importante, la différence entre les deux valeurs seuil est faible.

De même que pour la peau, nous étudions le transfert du sol vers la pulpe.

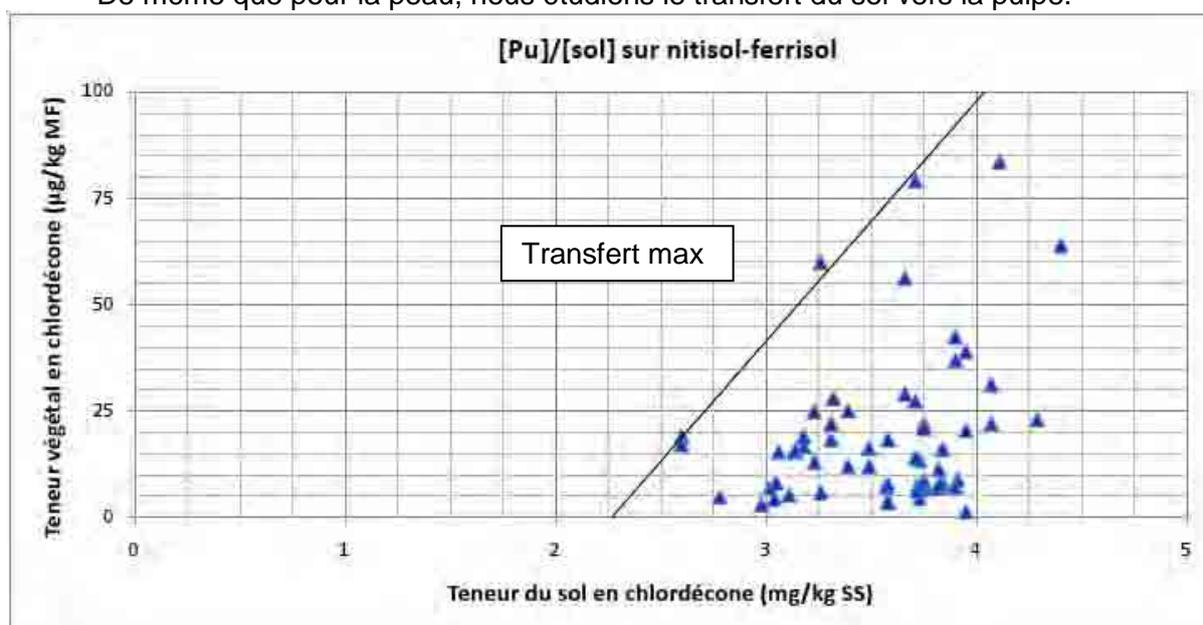


Figure 38 : Concombre - [Pu]/[sol] sur nitisol-ferrisol

Nous avons déterminé la courbe de transfert maximum de [Pu]/[Fe] sur nitisol-ferrisol (Figure 38).

Nous obtenons une teneur maximum du sol en chlordécone de 2.25 mg/kg pour un risque nul d'observer une contamination de la pulpe. La valeur seuil pour le risque de non-conformité est de 2.6 mg/kg.

Il est maintenant possible de comparer les courbes de transfert maximum

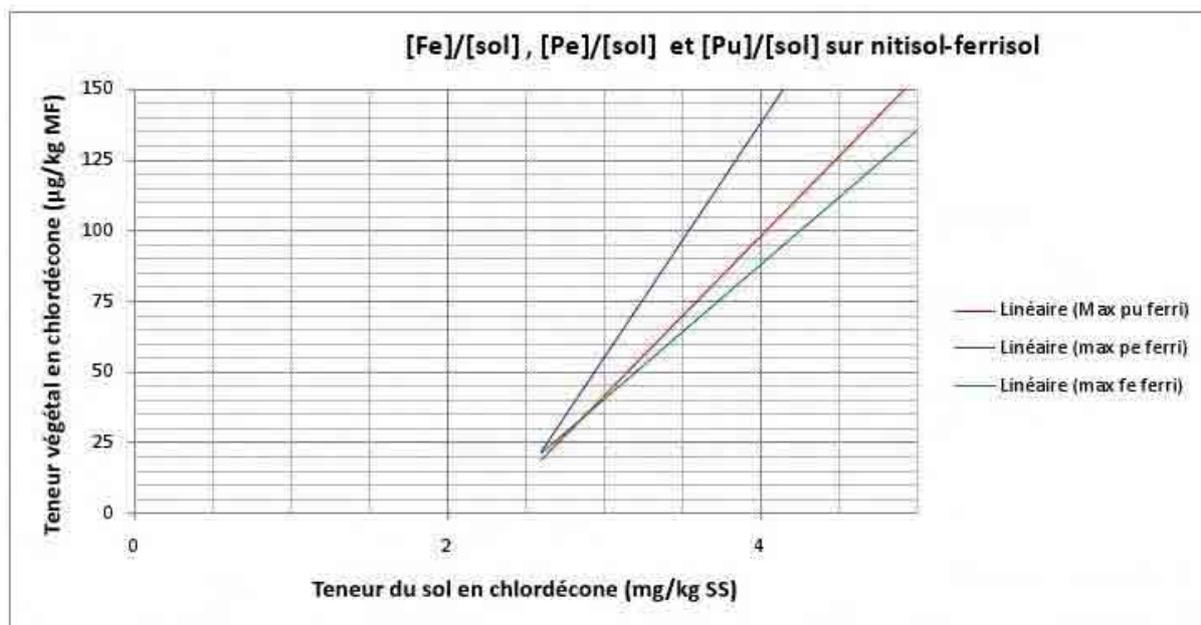


Figure 39 : Concombre - Transferts maxima de [Fe]/[sol], [Pe]/[sol] et [Pu]/[sol] sur nitisol-ferrisol

Nous constatons que sur ferrisol (Figure 39), les transferts maxima des trois compartiments sont relativement similaires en particulier celles de la pulpe et du fruit entier. La peau tendrait à être favorisée en termes de transfert maximum du sol vers la plante. La pente de toutes ces courbes est très forte, reflet d'un transfert important sur ce type de sol.

Rappelons que sur andosol, nous observions également des comportements similaires.

Nous nous intéressons maintenant à la comparaison des comportements au champ et sous serre (Figure 40).

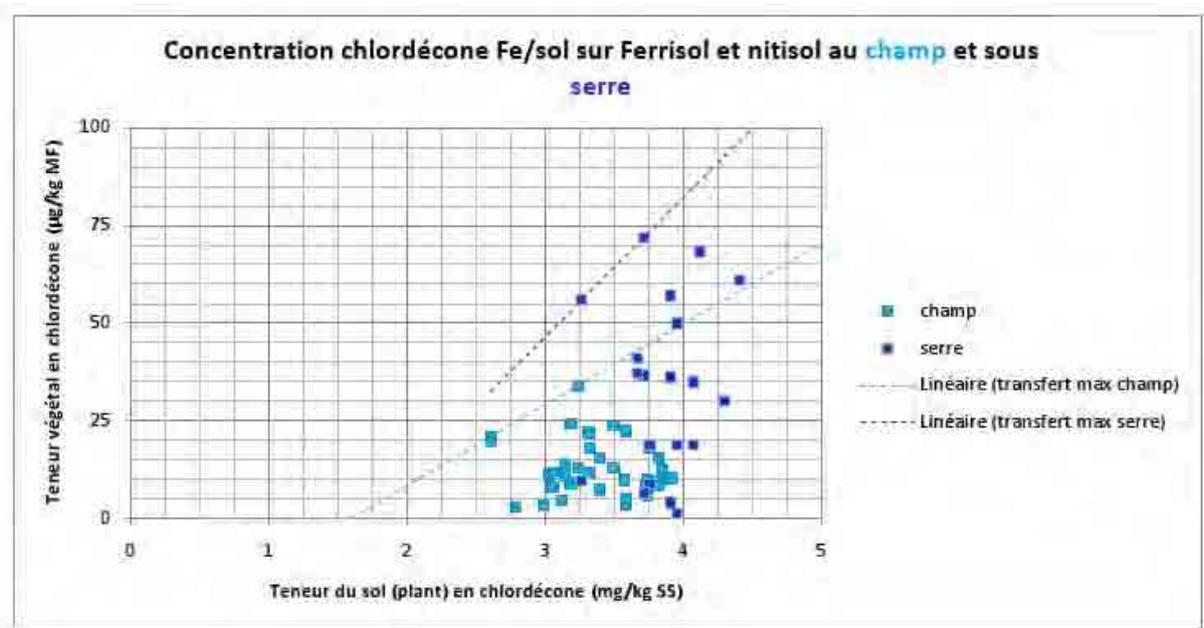


Figure 40 : Concombre - [Fe]/[sol] sur nitisol-ferrisol au champ et sous serre

Au champ, une assez faible hétérogénéité des teneurs du sol apparaît clairement. Ce constat pourrait être lié au fait que le sol de la parcelle a été travaillé en profondeur depuis de nombreuses années. Étonnament, les résultats obtenus sous serre pour le fruit entier présentent une hétérogénéité supérieure à ceux obtenus au champ alors que les conditions de culture sont supposées plus homogènes, l'effet plante est donc plus important.

La courbe de transfert maximum sous serre (courbe bleue foncée en pointillés Figure 40) présente une pente nettement supérieure à celle du transfert maximum au champ (courbe bleue claire en pointillés Figure 40). L'hypothèse de la maximisation du transfert de chlordécone du sol vers le fruit entier sous serre est bien confirmée par ces résultats.

2.3.4 Comparaison andosol et nitisol-ferrisol

Pour la comparaison du transfert pour les deux types de sol, nous nous limiterons à l'étude du rapport [Fe]/[Sol]. En effet, les mêmes constatations peuvent être faites à la lecture des graphiques pour le fruit entier, la peau et la pulpe.

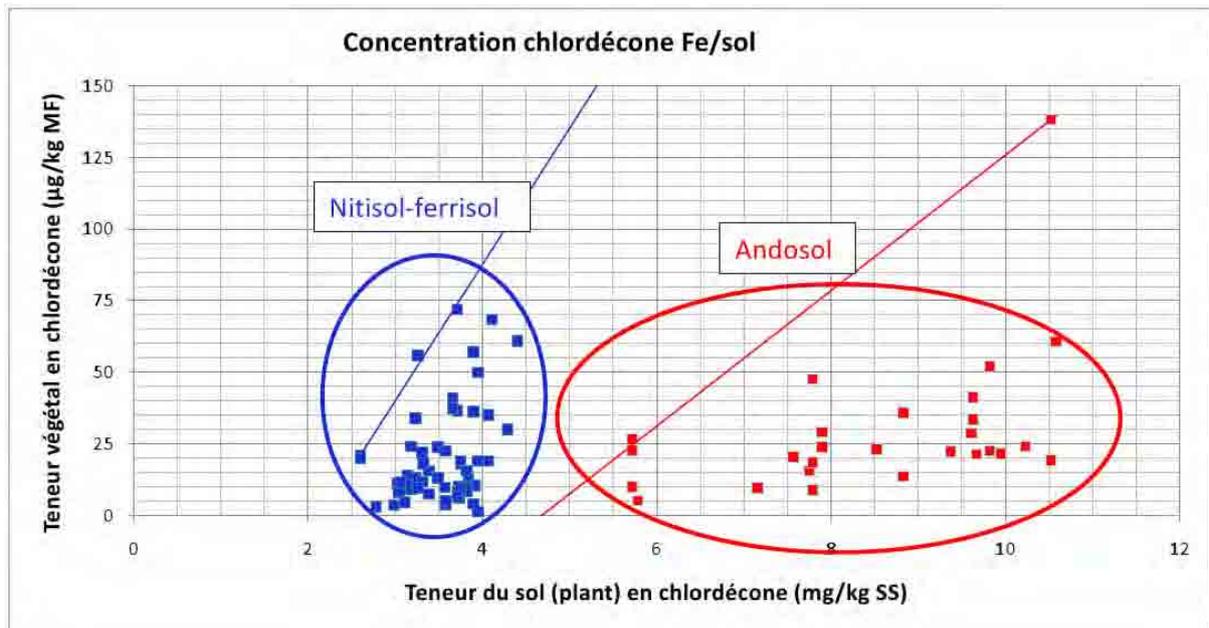


Figure 41 : Concombre - [Fe]/[sol] tous sols

Le transfert est beaucoup plus important sur nitisol-ferrisol que sur andosol puisque des teneurs identiques en chlordécone du fruit entier correspondent à des concentrations du sol plus élevées sur andosol (Figure 41).

Si l'on raisonne tous types de sol confondus, le transfert de la molécule sur nitisol-ferrisol du sol vers la plante est beaucoup plus important que sur andosol.

Cela confirme les résultats du comportement de la molécule dans les différents types de sol aux Antilles, avec une labilité et une disponibilité de la chlordécone supérieures dans le cas des nitisols.

2.3.5 Conclusions

C'est sous serre, dans le cadre de conditions dites forcées, que l'on obtient les transferts maxima de chlordécone du sol vers la plante et ce quel que soit le type de sol.

Sur nitisol-ferrisol, le transfert est beaucoup plus important que sur andosol : pour une même contamination en chlordécone des compartiments végétaux, le niveau de pollution correspondant sur ferrisol-nitisol est trois fois moins important que celui sur andosol. **Le potentiel de contamination d'un ferrisol-nitisol est plus important que celui d'un andosol.**

Nous constatons enfin qu'il serait nécessaire de reconduire des essais au champ afin de compléter les plages de concentrations du sol en chlordécone pour lesquelles nous n'avons pas de données. Ces vides correspondent aux trois parcelles sur lesquelles il n'a pas été possible d'avoir de récolte. Les plages de concentrations concernées par ce manque d'information sont de 2 à 6 mg/kg sur andosol et de 1 à 3 mg/kg sur nitisol.

2.3.6 Vers un outil pour le choix des cultures

Pour l'instant, si la relation entre les concentrations en chlordécone du sol et de la plante est évidente, les faibles coefficients de détermination obtenus montrent la forte

hétérogénéité du transfert sol/plante au sein même de la parcelle. Il est donc impossible d'obtenir des modèles prédictifs avec une marge d'erreur acceptable en l'état de nos connaissances.

En revanche, à l'aide de la courbe de transfert maximum, nous pouvons déterminer graphiquement la teneur maximale du sol pour laquelle nous avons obtenu des fruits entiers conformes ($[Fe] \leq 20 \mu\text{g/kg}$). Il suffit de déterminer l'abscisse du point d'ordonnée $20 \mu\text{g/kg}$ de la courbe de transfert maximum (Figure 42).

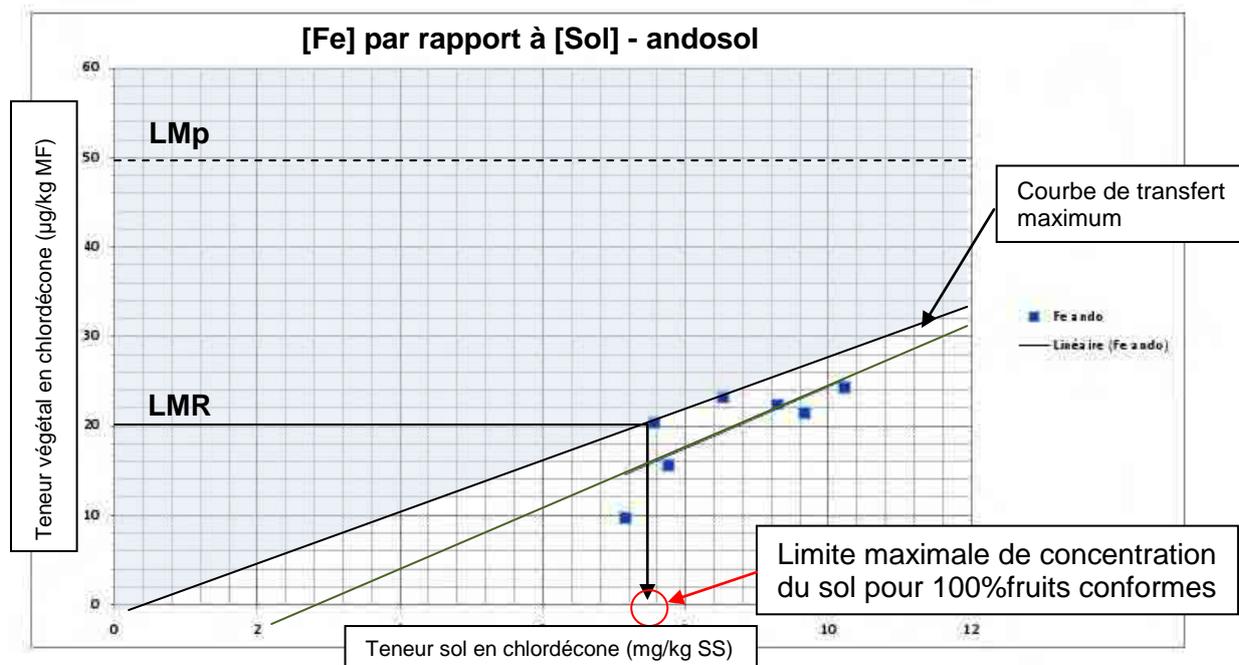


Figure 42 : Détermination graphique de la concentration maximale du sol pour laquelle 100% de conformité du fruit

En s'intéressant au transfert maximum et en appliquant le principe de précaution inhérent à toute étude en lien avec la santé humaine, on s'affranchit en grande partie du problème d'hétérogénéité. Il serait donc possible, comme cela a été fait pour les tubercules, de déterminer la concentration maximale du sol en chlordécone pour laquelle on est théoriquement certain d'obtenir 100% de conformité. Ces données permettront d'abonder un outil d'aide à la décision pour les cultivateurs, tant professionnels qu'amateurs, regroupant ces concentrations maximum du sol pour différentes cultures.

Le comportement des trois compartiments vis-à-vis du transfert maximum de chlordécone étant relativement similaire, nous ne nous intéressons qu'au fruit entier, référence réglementaire en matière de teneur maximum en résidus de pesticides pour la commercialisation.

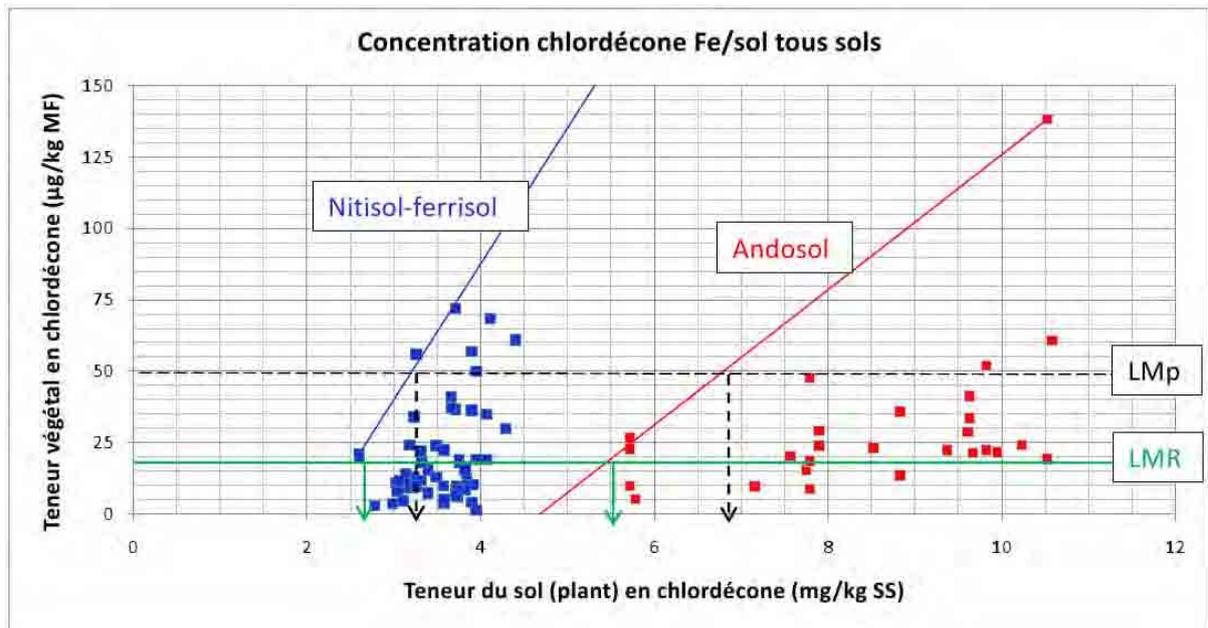


Figure 43 : Concombre - Détermination graphique des concentrations maximales sur andosol et ferrisol-nitisol

Nous obtenons des valeurs de 5.5 mg/kg (soit 5500 µg/kg) sur andosol et de 2.6 mg/kg (soit 2600 µg/kg) sur ferrisol-nitisol pour la LMR.

En conclusion, le taux de transfert maximal est de l'ordre de 1/100 ($20/2600=1/130$). La culture du concombre sur sol contaminé par le chlordécone serait donc possible (sans que les fruits ne dépassent la LMR) jusqu'à une concentration du sol en chlordécone de 2 mg/kg.

Si on s'intéresse aux teneurs limites du sol pour ne pas dépasser la LMp, les valeurs sont assez proches : 6.8 mg/kg sur andosol et 3.2 mg/kg sur ferrisol-nitisol.

A noter que seule une très faible surface de la sole martiniquaise est contaminée à hauteur de 2mg/kg. Cette valeur est à rapprocher des données disponibles concernant les concentrations de sol mesurées en jardins familiaux dans le cadre des enquêtes du programme JAJA afin d'évaluer le risque pour les consommateurs.

2.4 Résultats complémentaires « hors JAJA »

Des données complémentaires recueillies en 2009 et 2010 dans le cadre de l'établissement des référentiels sol/plante (action 30 du Plan National d'Action Chlordécone), alertent, elles aussi, sur le niveau du transfert de chlordécone du sol vers les concombres pour les nitisols présentant un niveau de contamination élevé. Pour ces échantillons aussi l'épluchage ne semble pas permettre une réduction significative de l'exposition du consommateur.

Dans cette même étude, la concentration maximale du sol en chlordécone pour laquelle on obtient 100% de conformité du fruit est de l'ordre de 2,4 mg/kg de sol, ce résultat reste à valider sur un nitisol.

Les résultats obtenus dans le cadre de ces deux volets du Plan National d'Action Chlordécone sont donc cohérents.

2.5 Préconisations envisagées

L'étude du transfert de la chlordécone du sol vers les différents compartiments (fruit entier, peau et pulpe) de concombre a permis de constater, d'une part, la tendance de la peau à être statistiquement plus contaminée en moyenne que la pulpe et, d'autre part, la plus grande variabilité de la teneur en chlordécone de la peau, par rapport à celles des autres compartiments. **Ceci nous permet de dire que le lavage et l'épluchage sont des préconisations valables à communiquer aux consommateurs.**

D'autre part, au vu des résultats obtenus, il est possible de dire que les valeurs de concentration en chlordécone du sol au-delà desquelles on peut observer des non-conformités sur concombre (2 mg/kg sur ferrisol-nitisol et 5 mg/kg sur andosol) correspondent à des sols fortement pollués, relativement peu fréquents sur les jardins familiaux dont le sol a déjà été analysé.

Compte tenu de la maximisation du transfert sous serre, en raison du sol fortement pollué et du faible volume d'enracinement, il apparaît primordial que toute préconisation de culture en bac chez les particuliers ayant un sol pollué s'accompagne d'une explication quant à la nécessité de se procurer un support de culture (sol ou compost) pas ou peu contaminé par la chlordécone.

En résumé, sur des sols contaminés par la chlordécone à moins de 2 µg/kg, la culture du concombre ne pose pas de problème vis-à-vis du transfert de chlordécone du sol vers la plante à condition de respecter les conseils de lavage et d'épluchage ; cette limite peut même être ramenée à 5 mg/kg sur andosol.

3 Résultats pour le giraumon

Dans le cadre de cette étude, nous disposons de 51 résultats de recherche de chlordécone pour chacun des trois compartiments crus et 47 en ce qui concerne la pulpe cuite, soit 204 échantillons analysés.

Les tiges rampantes (voire grimpantes) du giraumon nécessitant une importante surface de développement, les expérimentations ont été conduites uniquement au champ. Nous avons pu récolter des échantillons sur 3 parcelles : un andosol, un ferrisol et un nitisol.

3.1 Ventilations des teneurs et taux de conformité

3.1.1 *Ventilation des teneurs en chlordécone mesurées*

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à la ventilation des teneurs des sols en chlordécone (Tableau 13). Nous ne disposons pas des sols correspondants aux fruits de la parcelle sur nitisol, nous avons donc les données de sol pour une parcelle sur andosol et une sur ferrisol.

Étiquettes de lignes	Valeurs				
	Nombre	Moyenne	Min	Max	Ecartype
Andosol	84,00	1,34	0,04	5,69	1,24
Ferrisol+Nitisol	52,00	2,50	1,42	3,20	0,49
Total général	136,00	1,68	0,04	5,69	1,19

Tableau 13 : Giraumon - Concentrations en chlordécone des échantillons de sol par type de sol (mg/kg SS)

Nous constatons que les teneurs observées sur la parcelle d'andosol avec une moyenne de 1.34 mg/kg SS et sur la parcelle de ferrisol avec une moyenne de 2.5 mg/kg de SS sont assez proches.

En revanche, les écart-types sont très différents. L'hétérogénéité des concentrations du sol en chlordécone est très importante sur la parcelle d'andosol avec un écart-type de l'ordre de 100%, ceci reflète que la parcelle a été relativement peu travaillée. Tandis que la parcelle de ferrisol est, quant à elle, assez homogène puisque l'écart-type n'est que de 20%, reflet d'un travail du sol plus fréquent.

Une première analyse des résultats de recherche de chlordécone pour les échantillons de giraumon permet de constater, d'une part, que presque tous les résultats sont positifs à la recherche de chlordécone et, d'autre part, que les concentrations en chlordécone dans les giraumons présentent une très forte hétérogénéité, comme c'était le cas pour les concombres.

Nous nous intéressons dans un premier temps aux données par dispositif expérimental.

Type de sol et parcelles	[chld]	Moyenne	Min	Max	Ecartype
Andosol					
Ando3	104	11,5	1,3	67,1	9,9
Ferrisol et Nitisol					
Ferri	83	21,8	0,0	113,1	23,5
Niti	12	15,8	1,5	64,8	18,2
Total général	199	16,1	0,0	113,1	18,0

Tableau 14: Giraumon - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par parcelle ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

Il est à noter que nous ne disposons que de peu de résultats concernant le dispositif sur nitisol : seules 4 répétitions de fruit entier, peau, et pulpe (il n'y pas de pulpe cuite pour ce dispositif) ont été analysées soit 12 échantillons au total. En raison de leur faible représentativité, nous ne commenterons pas en détail ces résultats.

Nous observons des teneurs globalement plus faibles (tant minima que maxima et moyennes) que pour le concombre alors que les parcelles ont des sols dans les mêmes gammes de concentration. Les minima sont du même ordre de grandeur, entre 0 et 1.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$, en revanche, le maximum sur ferrisol (113,1 $\mu\text{g}/\text{kg}$) est bien supérieur à celui observé sur andosol (67.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$).

La moyenne, quant à elle, se situe en-dessous ou légèrement au-dessus de la LMR alors que les dispositifs étaient implantés sur des parcelles dont la teneur en chlordécone est de l'ordre de 1.5-2.5 mg/kg. La moyenne des teneurs en chlordécone observées dans les échantillons végétaux est deux fois plus importante sur ferrisol que sur andosol ce qui, étant données les teneurs moyennes dans le sol (2.5 mg/kg sur ferrisol et 1.34 mg/kg pour l'andosol), laisse penser que les transferts sur andosol et sur ferrisol seraient du même ordre.

Enfin, au vu des écarts-types de l'ordre de 100% par rapport à la moyenne et ce pour chaque type de sol, nous pouvons dire que nous retrouvons la grande variabilité déjà observée pour le concombre.

Nous étudions maintenant les données ventilées par grand type de sol et compartiment végétal.

Valeurs					
Étiquettes de lignes	Nombre	Moyenne	Min	Max	Écartype
Andosol	104,0	11,5	1,9	67,1	9,5
Fe	26,0	9,5	3,2	31,8	5,7
Pe	26,0	22,1	5,7	67,1	12,8
Pu	26,0	6,1	2,1	17,7	3,2
PuC	26,0	8,4	1,3	32,3	6,1
Ferrisol+Nitisol	96,0	21,8	0,0	113,1	23,3
Fe	25,0	18,1	2,8	41,9	11,1
Pe	25,0	48,4	4,4	113,1	31,8
Pu	25,0	7,5	0,0	18,8	4,9
PuC	21,0	11,4	1,8	28,0	6,9
Total général	200,0	16,4	0,0	113,1	18,7

Tableau 15 : Giraumon - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par compartiment végétal ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

Nous constatons que la répartition des effectifs entre les deux grands types de sol est très équilibrée : 104 résultats obtenus sur andosol et 96 sur ferrisol-nitisol.

La moyenne des teneurs des compartiments végétaux en chlordécone sur ferrisol-nitisol est nettement plus élevée que sur andosol. Ceci est cohérent, d'une part, avec une teneur moyenne du sol plus élevée sur ferrisol dont l'effectif est prépondérant dans le type ferrisol-nitisol et, d'autre part, un transfert comparable sur les deux types de sols.

Il est à noter que les teneurs en pulpe crue sont toutes inférieures à la LMR puisque les maxima sont respectivement de $17,7 \mu\text{g}/\text{kg}$ sur andosol et $18,8 \mu\text{g}/\text{kg}$ sur ferrisol-nitisol. Quant à la pulpe cuite, les maxima se situent autour de $30 \mu\text{g}/\text{kg}$. Les maxima absolus pour chaque type de sol sont obtenus pour des échantillons de peau avec $67,1 \mu\text{g}/\text{kg}$ sur andosol et $113,1 \mu\text{g}/\text{kg}$ sur ferrisol-nitisol.

Comme pour le concombre, tous résultats par compartiment ne suivent pas une distribution de loi normale (cf. annexe 9). Les échantillons étant appariés, nous avons eu recours à un test de Friedman puis avons procédé à des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9).

Sur andosol, il existe une différence statistique de teneurs en chlordécone entre peau et pulpe crue comme cuite (p-value < 0,0001) mais aussi avec le fruit entier (p-value = 0,000).

Sur ferrisol-nitisol, nous observons également des concentrations statistiquement différentes entre la peau et les autres compartiments : fruit entier (p-value = 0.027), pulpe crue (p-value < 0.0001) et pulpe cuite (p-value < 0.0001).

Pour les deux types de sol, la peau apparaît avoir un comportement statistiquement différent des autres compartiments. Elle présente des moyennes plus de deux fois plus élevées que celles du fruit entier et près de 4 fois à 6 fois plus élevées que celles de la pulpe crue. **Il apparaît donc que, pour le giraumon, le transfert de chlordécone vers la peau est privilégié par rapport à celui vers la pulpe.**

Par ailleurs, les écart-types sont globalement plus faibles sur andosol (90% de la moyenne) que sur ferrisol-nitisol (130% de la moyenne).

Nous nous intéressons maintenant à la ventilation des concentrations en chlordécone dans les différents compartiments végétaux. Les tableaux 16 à 19 et les représentations graphiques correspondantes (Figure 44 à Figure 46) présentent la répartition des concentrations en chlordécone du fruit entier (Fe), de la peau (Pe), de la pulpe (Pu) et de la pulpe cuite (PuC).

Nous nous intéressons tout d'abord à la répartition des teneurs en chlordécone observées dans les différents compartiments tous types de sols confondus.

Classes	Tout			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	51	51	51	47
0µg/kg	0,0%	0,0%	2,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	98,0%	100,0%
>10µg/kg	56,9%	84,3%	19,6%	38,3%
>20µg/kg	17,6%	58,8%	0,0%	8,5%
>50µg/kg	0,0%	27,5%	0,0%	0,0%

Tableau 16 : Giraumon - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

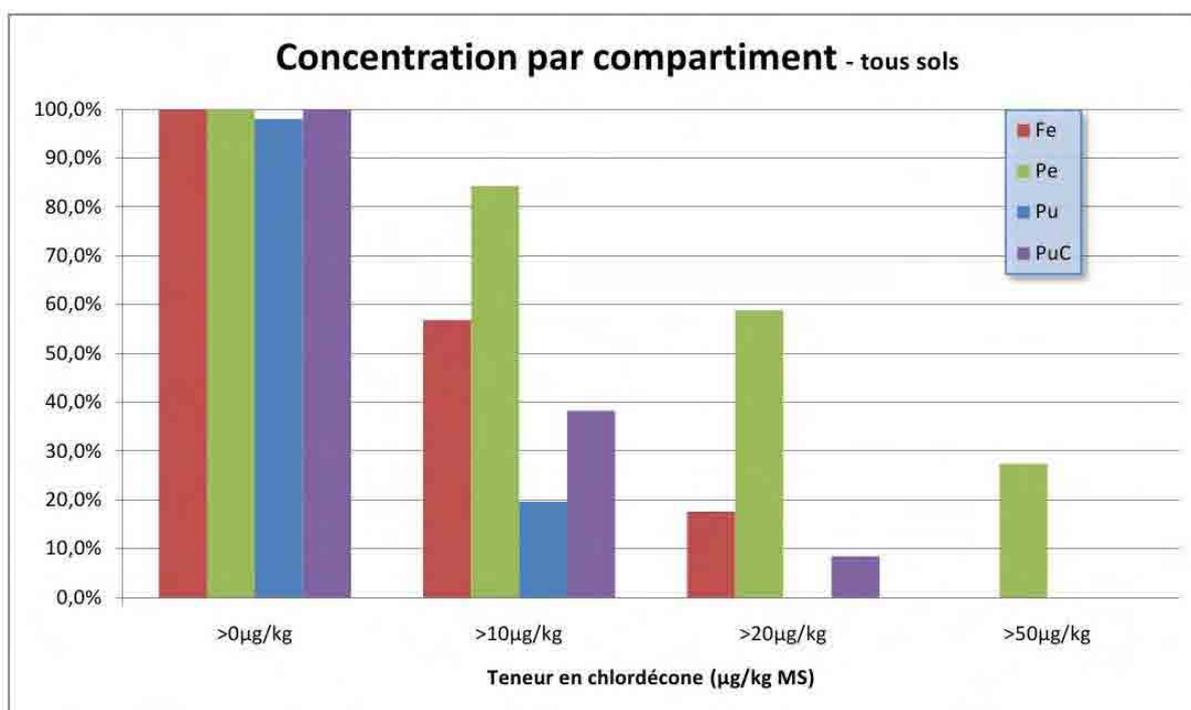


Figure 44 : Giraumon - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment (µg/kg MF)

Nous constatons que tous les résultats obtenus sont supérieurs à 0 sauf pour un échantillon de pulpe dans lequel aucune trace de chlordécone n'a été détectée.

Tous les échantillons de pulpe sont conformes, c'est-à-dire qu'ils ont une concentration en chlordécone inférieure ou égale à 20 µg/kg, alors que 17,6% des échantillons de fruits entiers et 58,8% des échantillons de peau ne le sont pas. En ce qui concerne la pulpe cuite, 8,5% des échantillons sont non-conformes, ce qui est assez faible mais supérieur aux résultats obtenus sur pulpe crue.

Près de 30% des peaux sont contaminées au-delà de 50 µg/kg, ancienne limite maximale provisoire. Aucun dépassement de la Lmp n'est observé sur les échantillons de fruit entier et de pulpe que ce soit crue ou cuite.

La tendance de la peau à être plus contaminée que les autres compartiments est confirmée par la distribution des concentrations.

Concernant l'andosol, nous obtenons les résultats suivants :

Classes	andosol			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	26	26	26	26
0µg/kg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	38,5%	84,6%	7,7%	30,8%
>20µg/kg	3,8%	42,3%	0,0%	3,8%
>50µg/kg	0,0%	3,8%	0,0%	0,0%

Tableau 17 : Giraumon - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

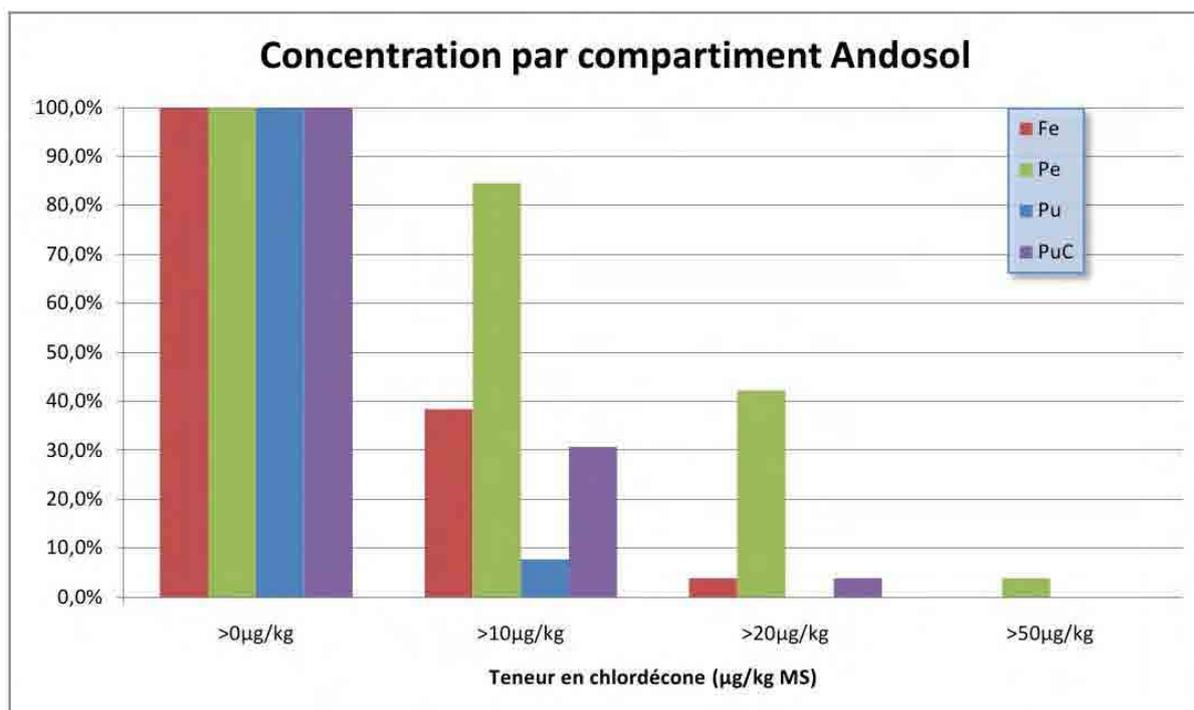


Figure 45 : Giraumon - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Sur andosol, 100% des échantillons analysés sont positifs à la recherche de chlordécone. Comme pour tous sols confondus, les différents compartiments présentent un comportement bien distinct. Aucun échantillon de pulpe n'est contaminé au-delà de la LMR alors qu'au moins un échantillon de peau est contaminé au-delà de 50 µg/kg. Deux fois plus d'échantillons de peau sont contaminés au-delà de 10 µg/kg que d'échantillons de fruit entier. Tous les résultats au-delà de 20 µg/kg concernent des échantillons de peau sauf un de fruit entier et un de pulpe cuite.

Ces constatations sont en faveur de l'hypothèse d'un transfert privilégié vers la peau par rapport à la pulpe. L'analyse détaillée des transferts observés devrait permettre de confirmer cette hypothèse.

Les résultats obtenus sur ferrisol-nitisol sont répartis comme suit :

Classes	nitisol et ferrisol			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	25	25	25	21
0µg/kg	0,0%	0,0%	4,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	96,0%	100,0%
>10µg/kg	76,0%	84,0%	32,0%	47,6%
>20µg/kg	32,0%	76,0%	0,0%	14,3%
>50µg/kg	0,0%	52,0%	0,0%	0,0%

Tableau 18 : Giraumon - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur nitisol et ferrisol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

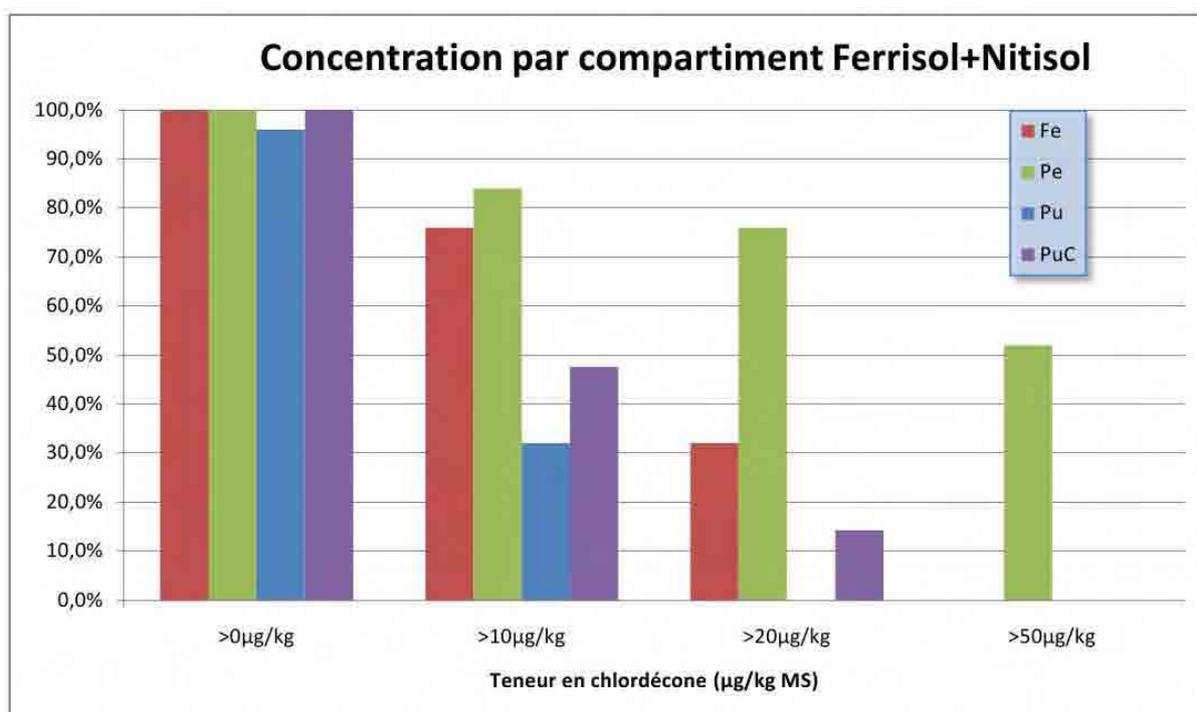


Figure 46 : Giraumon - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur nitisol et ferrisol (µg/kg MF)

Sur ferrisol-nitisol, seul un des échantillons analysés n'est pas positif à la recherche de chlordécone, il s'agit d'une pulpe dans laquelle aucune trace de chlordécone n'a été détectée.

Nous observons beaucoup plus de non-conformités de la peau et du fruit entier que sur andosol. La peau est, là aussi, nettement plus représentée que les autres compartiments dans les valeurs supérieures à la LMR et à la LMp avec en particuliers plus de 50% d'échantillons de peau ayant une teneur en chlordécone supérieure à 50 µg/kg.

A l'inverse, tous les échantillons de pulpe ont des concentrations inférieures à la LMR et seuls 33% présentent une concentration supérieure à 10 µg/kg.

Pour ce qui est de la pulpe cuite, 15% des échantillons sont non-conformes et aucun n'atteint une contamination de 50 µg/kg.

3.1.2 Taux de conformité

Pour l'étude des taux de conformité obtenus, c'est-à-dire du pourcentage d'échantillons dont la concentration est inférieure ou égale à la LMR de 20 µg/kg, on s'intéresse plus particulièrement au fruit entier et à la pulpe crue et cuite. En effet, la peau n'étant que rarement consommée, on considère que la notion de conformité est moins pertinente pour ce compartiment.

Nous étudions tout d'abord les taux de conformité en fonction du type de sol. Nous rappelons que pour chaque sol, seul un dispositif (une parcelle en l'occurrence) a été récolté.

Nombre de <=20µg			Conformité
Culture	Type	Total	%
Giraumon	Andosol	91	87,5%
	Ferrisol	56	66,7%
	Nitisol	10	83,3%
Total Giraumon		157	78,5%

Tableau 19 : Giraumon - Taux de conformité par type de sol

Nous constatons que les taux de conformité sont assez élevés, allant de 66.7% pour le ferrisol à 87.5% pour l'andosol. Il y a donc plus d'échantillons conformes sur andosol que sur ferrisol.

Rappelons que le faible effectif d'échantillons étudié sur nitisol ne permet pas d'analyser en détail les résultats concernant ce dispositif.

Nous nous intéressons maintenant à la ventilation des taux de conformité par compartiment végétal.

%<= 20µg (Fe et Pu)		Conformité	
Culture	Type2:	Total	%
Giraumon	Fe	42	82,4%
	Pe	21	41,2%
	Pu	51	100,0%
	PuC	43	91,5%
Total Giraumon		157	78,5%

Tableau 20 : Giraumon - Taux de conformité par compartiment

Tous les échantillons de pulpe sont conformes ainsi que 91.5% des échantillons de pulpe cuite ; en revanche moins de la moitié des échantillons de peau le sont.

Ces constatations sont en faveur de l'hypothèse d'une contamination privilégiée de la peau par rapport à la pulpe.

3.2 Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au fruit entier

La concentration en chlordécone dans le fruit entier, [Fe], sert de référence à la comparaison avec la concentration dans la peau, [Pe], d'une part, et dans la pulpe, [Pu], d'autre part.

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux deux types de sol séparément puis nous comparerons les résultats obtenus.

3.2.1 Expérimentations sur andosol

Concernant les résultats du dispositif sur andosol, nous obtenons les résultats suivants :

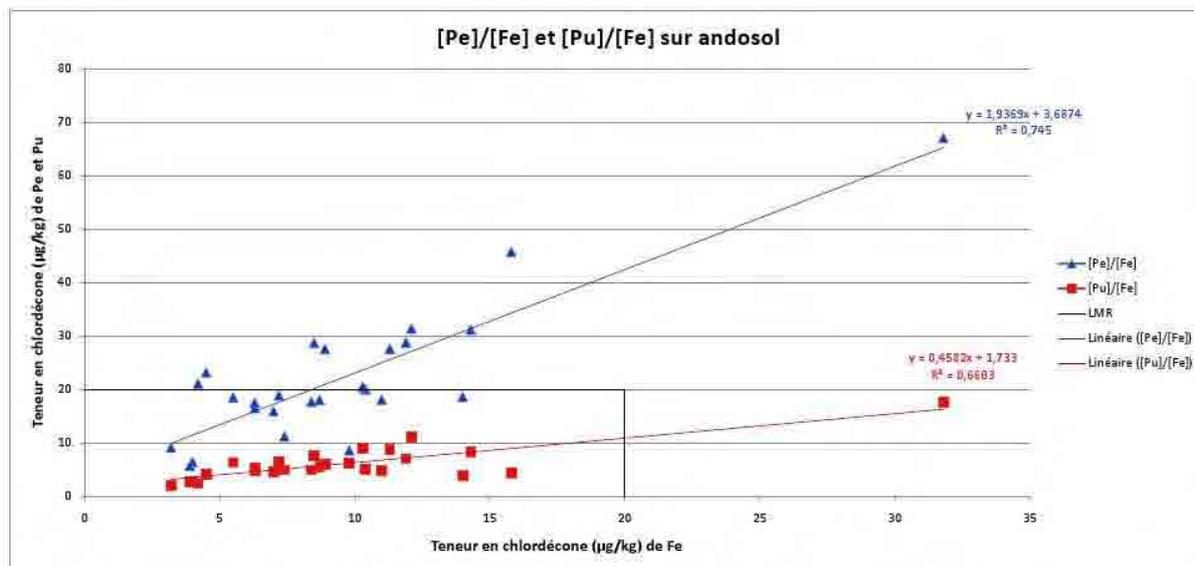


Figure 47 : Giraumon - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol

La grande majorité des résultats sont conformes, pour la pulpe il s'agit même de tous les résultats et pour le fruit entier de tous sauf un.

D'autre part, le comportement de la pulpe diffère clairement de celui de la peau. La courbe [Pe]/[Fe] (courbe bleue Figure 47) est nettement au-dessus de celle du comportement Pu/Fe (courbe rouge Figure 47). La peau est en moyenne environ trois fois plus contaminée que la pulpe. Or la différence de teneur en matière sèche entre la peau (13% de MS en moyenne, tous dispositifs confondus) et la pulpe (9.7% de MS en moyenne, tous dispositifs confondus) ainsi que la plus grande affinité de la chlordécone pour la matière sèche par rapport à celle pour l'eau ne suffisent pas à expliquer ce facteur trois, **sur andosol, le transfert de chlordécone vers la peau est donc nettement privilégié**. Ceci pourrait être expliqué par un contact prolongé avec le sol pendant le cycle de culture mais également par la physiologie du fruit, en particulier sa vascularisation (plus de vaisseaux dans la peau que dans la pulpe).

Les coefficients de détermination sont bons tant pour la relation peau/fruit entier ($r^2=0.74$) que pour celle pulpe/fruit entier ($r^2=0.66$), les résultats obtenus sont donc relativement homogènes.

Les coefficients de corrélation, quant à eux, sont très bons ($r=0.86$ pour peau/fruit entier et $r=0.81$ pour pulpe/fruit entier). Il existe donc une relation linéaire très forte entre les concentrations dans la pulpe et la peau et celle dans le fruit entier.

3.2.2 Expérimentations sur nitisol-ferrisol

En ce qui concerne les résultats des dispositifs sur ferrisol et nitisol, nous obtenons les résultats suivants :

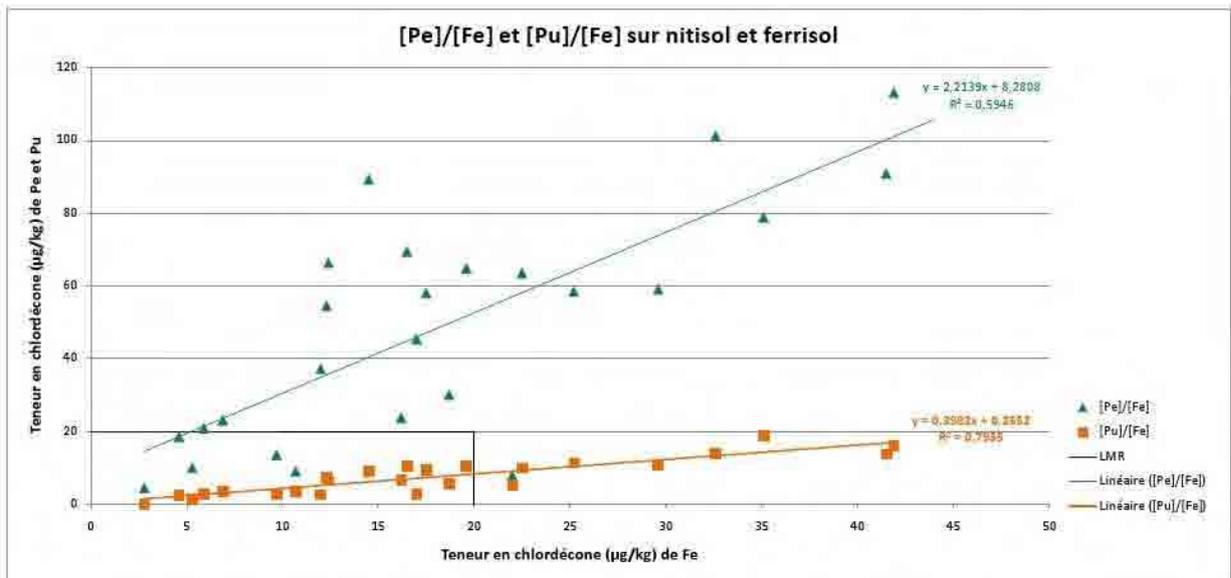


Figure 48 : Giraumon - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur ferrisol et nitisol

La lecture du graphe (Figure 48) confirme qu'environ 2/3 des échantillons de pulpe sont conformes tandis que peu de peaux sont conformes.

La répartition des résultats concernant la pulpe (courbe orange Figure 48) paraît bien homogène ce qui est confirmé par le bon coefficient de détermination ($r^2=0.79$). La relation peau/fruit entier (courbe verte Figure 48) semble avoir un comportement moins homogène (points plus épars) ce que le coefficient de détermination de 0.6 confirme.

La concentration dans la peau est liée à celle du fruit entier par une relation linéaire forte ($r=0.77$) tandis que la concentration dans la pulpe est liée par une relation linéaire très forte à celle du fruit entier ($r=0.89$).

Il existe une nette différence de comportement entre la peau et la pulpe, la courbe peau/fruit entier (courbe verte Figure 48) est nettement au-dessus de celle pulpe/fruit entier (courbe orange Figure 48). Comme sur andosol, **le transfert de chlordécone est donc privilégié vers la peau. La peau est en moyenne au moins 5 fois plus contaminée que la pulpe.**

3.2.3 Comparaison andosol/ferrisol-nitisol

Nous pouvons maintenant comparer les comportements observés sur les deux types de sols :

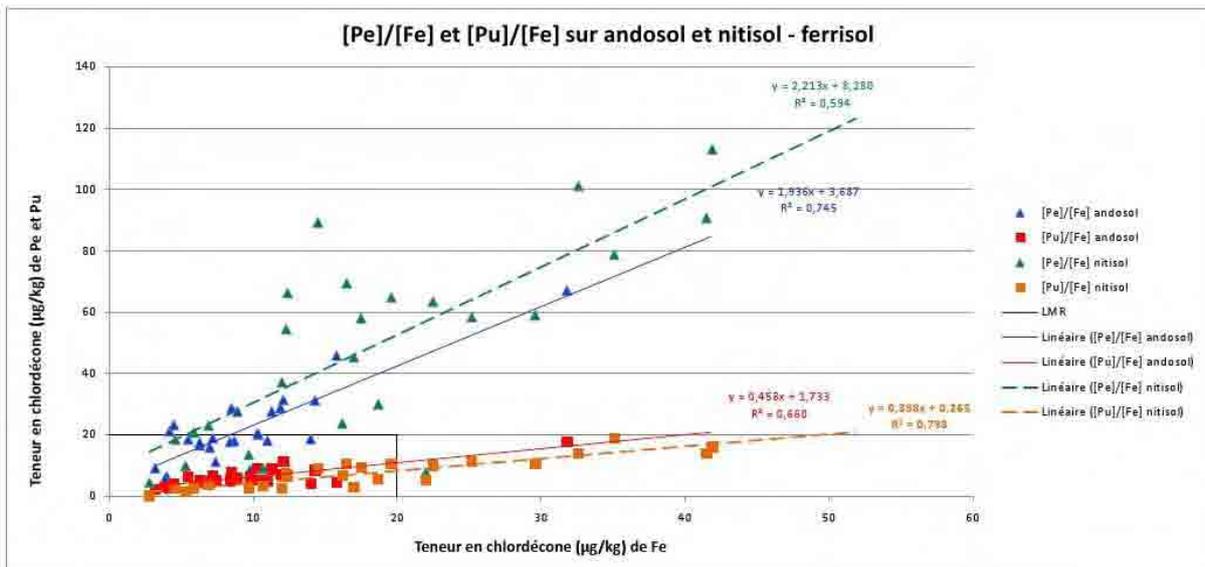


Figure 49 : Giraumon - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol et nitisol-ferrisol

Nous n'avons pas de mauvais coefficient de détermination (r^2 compris entre 0.6 et 0.9) ou de corrélation (r compris entre 0.7 et 0.9) de plus, les effectifs étudiés sont représentatifs. Ceci nous permet de valider statistiquement nos résultats.

Que ce soit pour la peau ou la pulpe, les comportements sur andosol et ferrisol-nitisol sont semblables comme le montrent, d'une part, les courbes [Pe]/[Fe] pour l'andosol (courbe bleue Figure 49) et pour le nitisol-ferrisol (courbe verte Figure 49) et, d'autre part, les courbes [Pu]/[Fe] pour l'andosol (courbe rouge Figure 49) et pour le nitisol-ferrisol (courbe orange Figure 49) qui sont très rapprochées. La diffusion de la molécule de chlorthaloxim au sein de la plante est donc indépendante du type de sol. Une fois pénétrée dans la plante, la molécule se diffuse selon les mêmes processus, elle se comporte donc de la même manière, quel que soit le type de sol sur laquelle le végétal est cultivé.

De plus, la nette différence de comportement entre la peau et la pulpe vis-à-vis du transfert de chlorthaloxim dans le fruit est confirmée.

Globalement, les coefficients de détermination sont légèrement meilleurs pour la pulpe que pour la peau avec, sur andosol, $r^2=0.66$ pour la pulpe et $r^2=0.75$ pour la peau et, sur ferrisol-nitisol, $r^2=0.80$ pour la pulpe et $r^2=0.59$ pour la peau. Comme précédemment vu dans le cas du concombre, l'hétérogénéité serait induite par le contact prolongé avec le sol dans le cas du giraumon ainsi que la prédominance de la pulpe par rapport à la peau dans le fruit entier.

Nous étudions maintenant les transferts tous sols confondus afin de pouvoir valider la similarité de comportement sur andosol et ferrisol-nitisol.

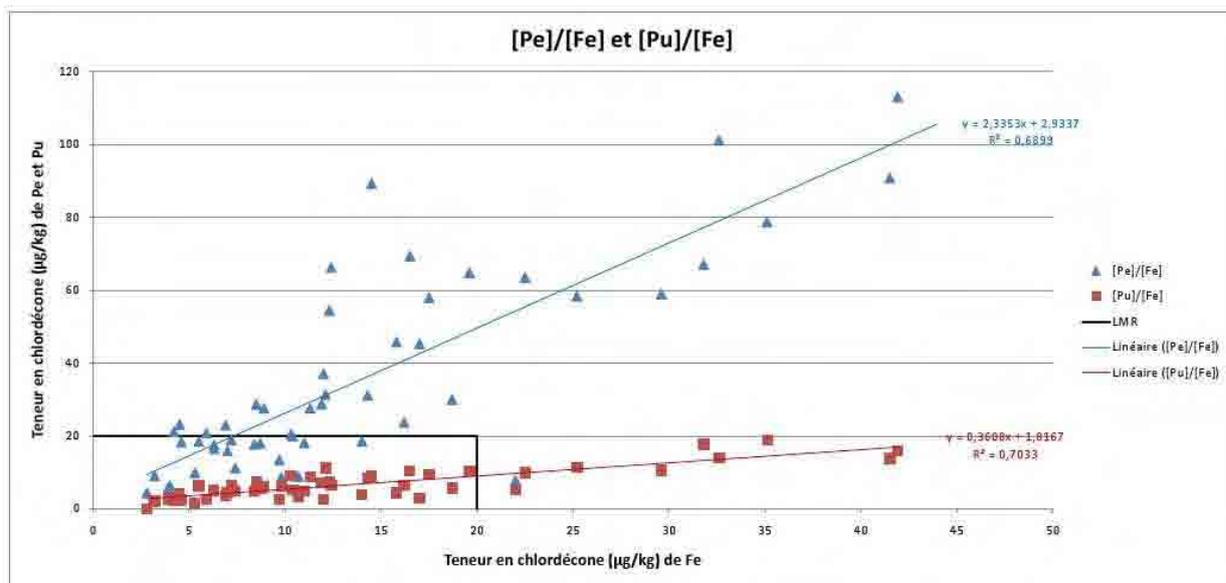


Figure 50 : Giraumon - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] tous types de sol confondus

Les bons coefficients de détermination de ces courbes, $r^2=0.69$ pour la peau (courbe bleue Figure 50) et $r^2=0.7$ pour la pulpe (courbe rouge Figure 50) confirment que le comportement du transfert sol giraumon est le même quel que soit le type de sol.

Les coefficients de corrélation, quant à eux, indiquent que la relation linéaire entre les concentrations est très forte tant pour le comportement de la peau par rapport au fruit entier ($r=0.83$) que pour celui de la pulpe par rapport au fruit entier ($r=0.84$).

Pour finir, nous nous intéressons aux concentrations observées dans la pulpe par rapport à celles observées dans la peau, tous types de sol confondus.

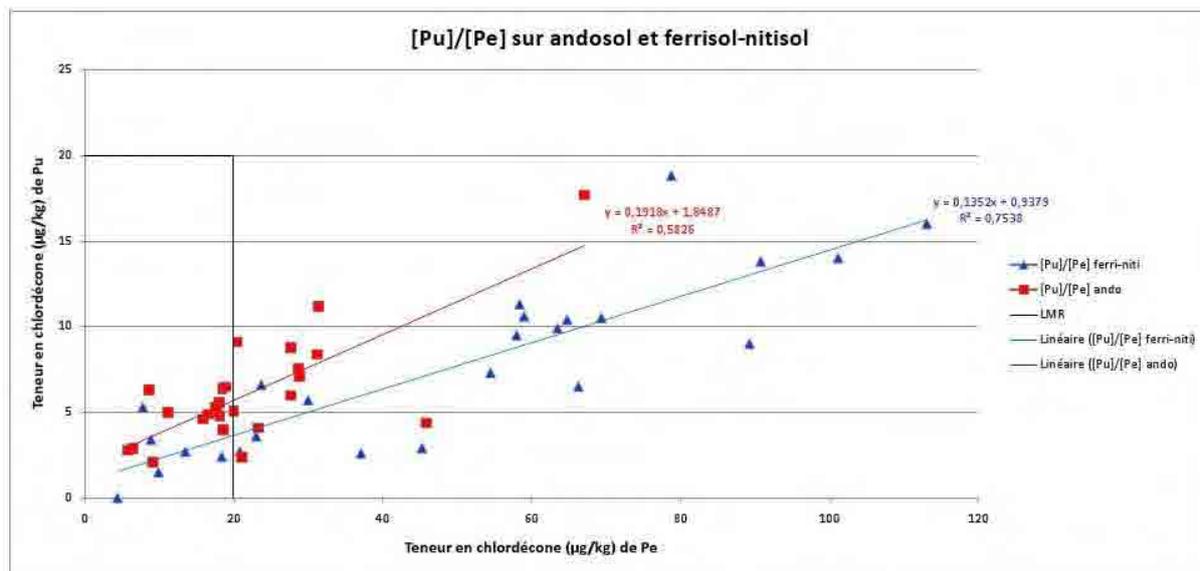


Figure 51 : Giraumon - Concentration dans Pu par rapport à [Pe] sur andosol et nitisol-ferrisol

Nous n'observons pas de différence notable de comportement entre andosol et ferrisol-nitisol comme le montre le faible écart, de l'ordre de quelques $\mu\text{g}/\text{kg}$, entre la courbe sur andosol (courbe rouge Figure 51) et celle sur ferrisol-nitisol (courbe bleue Figure 51) en particulier pour les valeurs faibles où nous avons le plus de données.

Le coefficient de détermination est bon ($r^2=0.75$) sur ferrisol-nitisol ce qui est cohérents avec les points relativement groupées autour de la courbe de tendance. Sur andosol le coefficient de détermination est un peu moins bon ($r^2=0.58$), reflet de la plus grande hétérogénéité des résultats.

Pour ce qui est des coefficients de corrélation, ils sont bons sur andosol ($r=0.76$) et très bons sur ferrisol-nitisol ($r=0.86$). La concentration dans la peau et celle dans la pulpe sont donc liées par des relations linéaires fortes tant sur andosol que sur ferrisol-nitisol.

En conclusion, le transfert peau-pulpe n'est pas strictement proportionnel ce qui serait lié à la physiologie du fruit : vascularisation et diffusion différenciée de la chlordécone ainsi que la nature des tissus pièges (plus de fibres dans la peau, plus d'eau et de sucre³⁰ dans la pulpe). D'autres facteurs liés aux conditions de culture (contact avec le sol pollué) influent sur la contamination des compartiments qui, de ce fait, est différenciée.

3.2.4 Effet de la cuisson

Dans le cadre de ce programme de recherche, nous nous sommes également intéressés à l'impact de la cuisson sur la teneur en chlordécone de la partie consommée, la pulpe. Nous allons donc comparer les résultats obtenus pour la pulpe crue (Pu) et la pulpe cuite (PuC). Nous commençons par les données sur andosol.

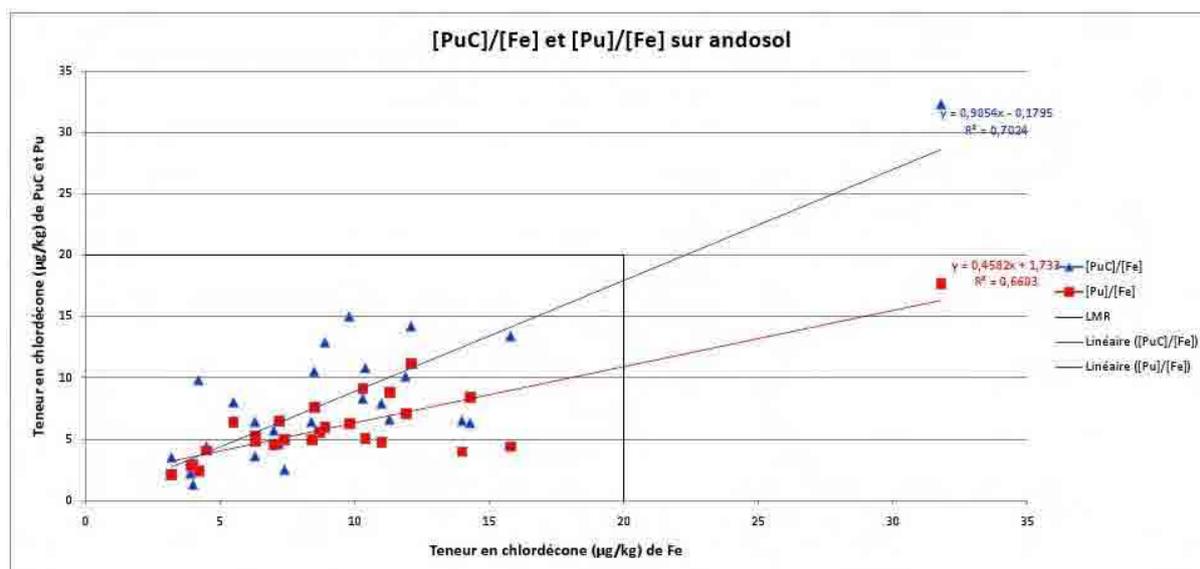


Figure 52 : Giraumon - Concentration dans Pu et PuC par rapport à [Fe] sur andosol

Sur andosol, nous constatons que les comportements de la pulpe crue (courbe rouge Figure 52) et de la pulpe cuite (courbe bleue Figure 52) par rapport au transfert de chlordécone sont relativement similaires. En effet, l'écart entre les deux courbes est assez faible, de l'ordre de 1 à 3 µg/kg dans la gamme de concentrations pour laquelle nous avons des données. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que l'incertitude liée aux valeurs des résultats d'analyse est de l'ordre de 30%.

Les comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9) montrent que **sur andosol, il n'existe pas de différence significative de teneurs en chlordécone entre pulpe crue et pulpe cuite (p-value = 0,053).**

L'hétérogénéité des résultats est semblable dans le cas de la pulpe crue ($r^2=0.66$) et dans celui de la pulpe cuite ($r^2=0.7$). De même, les coefficients de corrélation sont très proches et

³⁰ Holland, B., Unwin, I.D. & Buss, D.H., 1991

ont des valeurs témoignant de la très forte relation linéaire entre les concentrations dans les pulpes et dans le fruit entier ($r=0.81$ pour la pulpe et $r=0.84$ pour la pulpe cuite).

Sur andosol, il n'existe pas de différence de comportement entre la pulpe crue et la pulpe cuite par rapport au transfert de chlordécone.

Nous étudions maintenant les données obtenues sur ferrisol et nitisol pour la pulpe crue et la pulpe cuite.

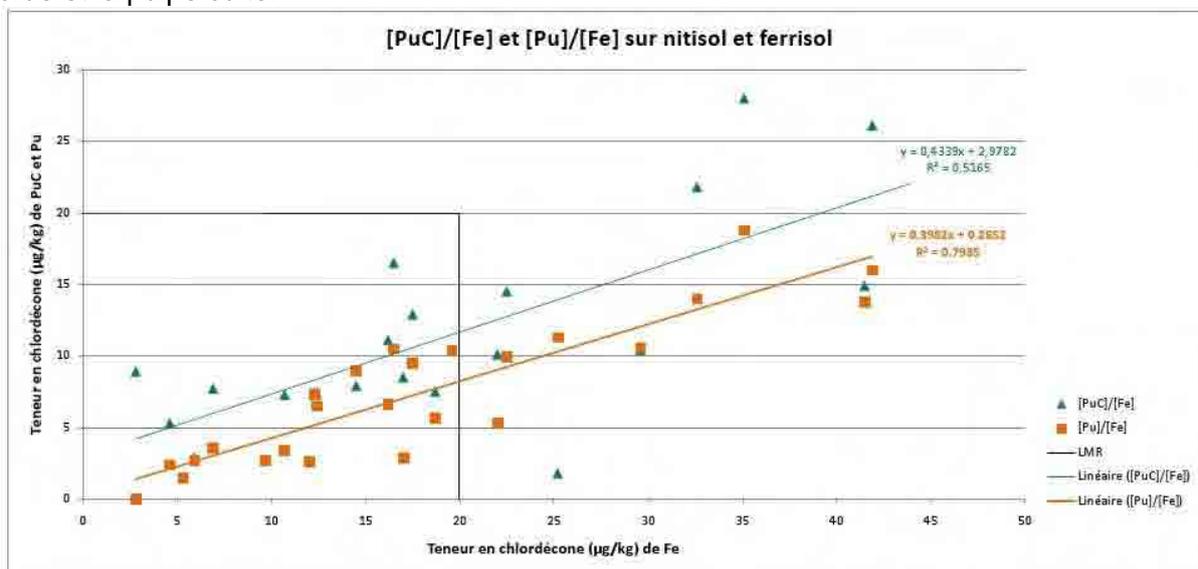


Figure 53 : Giraumon - Concentration dans Pu et PuC par rapport à [Fe] sur ferrisol et nitisol

Nous ne disposons des pulpes cuites que pour la parcelle de ferrisol, les fruits de la parcelle de nitisol n'ayant pu être cuits.

Sur ferrisol, comme sur andosol, l'écart entre la courbe [Pu] / [Fe] (courbe orange Figure 53) et la courbe [PuC] / [Fe] (courbe verte Figure 53) est assez faible, de l'ordre de 3 µg/kg dans la gamme de concentrations pour laquelle nous avons des données.

Le coefficient de détermination dans le cas de la pulpe cuite ($r^2=0.51$) est nettement moins bon que celui pour la pulpe crue ($r^2=0.79$). L'hétérogénéité de la relation pulpe cuite/fruit entier est assez forte alors que la relation pulpe crue/fruit entier est assez homogène.

Une analyse de la corrélation entre le stade de maturité et la différence de concentration entre la pulpe crue et la pulpe cuite par rapport à la concentration dans la pulpe crue (soit la relation $([Pu]-[PuC])/[Pu]$) permet de dire que cette variabilité ne peut être imputée au stade de maturité (cf. annexe 9).

Le coefficient de corrélation de la relation pulpe cuite/fruit entier est le reflet d'une relation forte ($r=0.71$), pour la pulpe crue, il s'agit d'une relation très forte avec le fruit entier ($r=0.89$).

Les comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9) montrent que **sur ferrisol, il existe une différence significative de teneurs en chlordécone entre pulpe crue et pulpe cuite (p -value = 0,014), la pulpe cuite apparaissant comme statistiquement plus contaminée que la pulpe crue.**

Les pulpes ayant été cuites dans l'eau distillée donc indemne de chlordécone, cet écart est difficile à expliquer.

D'autant plus que la différence de comportement entre pulpe crue et pulpe cuite ne peut être justifiée par la différence de teneur en matière sèche. En effet, une relation linéaire avec la teneur en matière sèche est écartée par un test de corrélation (cf. annexe 9).

Cette différence pourrait être liée à un biais de série lors de l'analyse des résidus de chlordécone, les pulpes crues ayant été analysées près de deux mois avant les pulpes cuites.

Sur ferrisol, si nous remarquons une plus forte hétérogénéité des données relatives à la pulpe cuite, les comportements de la pulpe crue et de la pulpe cuite sont statistiquement différents mais ce résultat n'a pas de justification logique en dehors d'un « biais série » lors de l'analyse.

Nous analysons finalement les données obtenues tous sols confondus afin de confirmer les hypothèses précédemment énoncées.

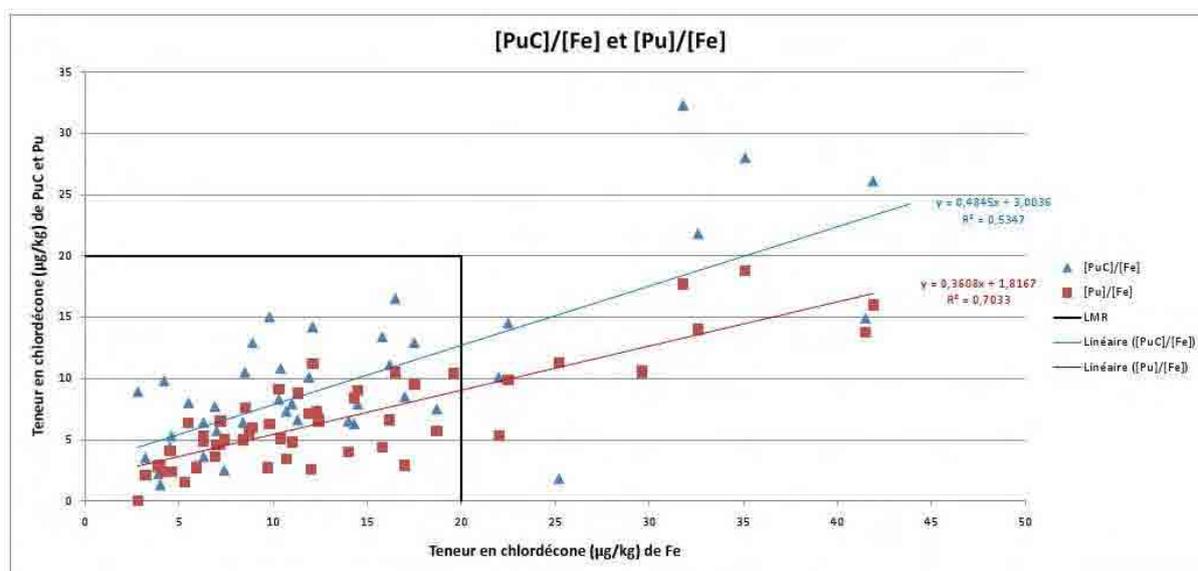


Figure 54 : Giraumon - Concentration dans Pu et PuC par rapport à [Fe] tous sols confondus

L'écart entre la courbe relative à la pulpe crue (courbe rouge Figure 54) et celle relative à la pulpe cuite (courbe bleue Figure 54) est faible étant donné l'échelle utilisée pour l'ordonnée. Néanmoins, la tendance de la pulpe cuite (en bleu, figure 54) à être plus contaminée que la pulpe crue (en rouge, figure 54) est confirmée visuellement (nuage de points correspondant à la pulpe cuite tendant à être au dessus de celui de la pulpe crue).

L'étude statistique des populations pulpe crue et pulpe cuite confirme cette différence de moyenne des teneurs tous sols confondus. Celle-ci est sans doute imputable à l'écart observé sur ferrisol.

L'hétérogénéité plus forte constatée sur ferrisol-nitisol impacte sur l'hétérogénéité globale, la pulpe cuite ($r^2=0.53$) a donc un coefficient de détermination inférieur à celui de la pulpe crue ($r^2=0.7$). Les relations linéaires entre les concentrations dans la pulpe et le fruit entier et celles dans la pulpe cuite et le fruit entier sont très fortes (pulpe, $r=0.84$) et forte (pulpe cuite, $r=0.69$).

3.2.5 Conclusions

L'épluchage du fruit permet, dans le cas du giraumon, de diminuer nettement l'exposition du consommateur par rapport aux teneurs observées dans le fruit entier. Le plus souvent la pulpe, crue comme cuite, présente une teneur en chlordécone inférieure à la LMR et ce malgré les forts niveaux de pollution des parcelles expérimentales utilisées. De plus, en cas de non-conformité, le dépassement de la LMR est assez faible.

Les pulpes cuites présentent une teneur moyenne en chlordécone statistiquement supérieures à celles des pulpes crues.

Les très faibles concentrations en chlordécone observées dans les eaux de cuisson de l'ordre de $0.15 \mu\text{g}/\text{kg}^{31}$ (avec particules en suspension) qui ont été analysées (10 échantillons) confirment qu'il n'y a pas d'effet de dilution de la molécule dans l'eau de cuisson (très faible transfert). Ceci est cohérent avec le peu d'affinité de la molécule de chlordécone pour l'eau qui exclut un transfert important de la pulpe vers l'eau de cuisson.

Les températures observées durant la cuisson, de l'ordre de 100°C , excluent une dégradation de la molécule par la chaleur en raison de sa structure très stable et de sa température de minéralisation supérieure à 1000°C .

L'hypothèse que cette différence de contamination moyenne soit due à la teneur en matière sèche a été écartée par analyse statistique (cf. annexe 9).

Il aurait été possible, mais peu probable, d'observer des pulpes cuites en moyenne moins contaminées que les pulpes crues mais l'inverse semble impossible à justifier. Seul un biais de série lors de l'analyse des résidus en laboratoire pourrait être à l'origine de cet écart, les échantillons ayant été traités à deux mois d'intervalle.

Il est difficile de conclure sur l'effet de la cuisson dans le cas du giraumon, l'étude des résultats sur racines et tubercules devraient nous fournir des éléments complémentaires.

3.3 Transferts sol-plante

Nous allons maintenant nous intéresser à la relation entre concentration dans le végétal et teneur du sol en chlordécone. Nous n'étudierons que les compartiments crus, tous analysés durant la même période au laboratoire.

Du fait du système racinaire du giraumon (système principal de la tige complété par des racines adventives aux nœuds de tige), nous avons analysé le sol au niveau du pied (sol pied) et au niveau du fruit (sol fruit). La distance entre les deux points de prélèvement est de l'ordre de plusieurs mètres.

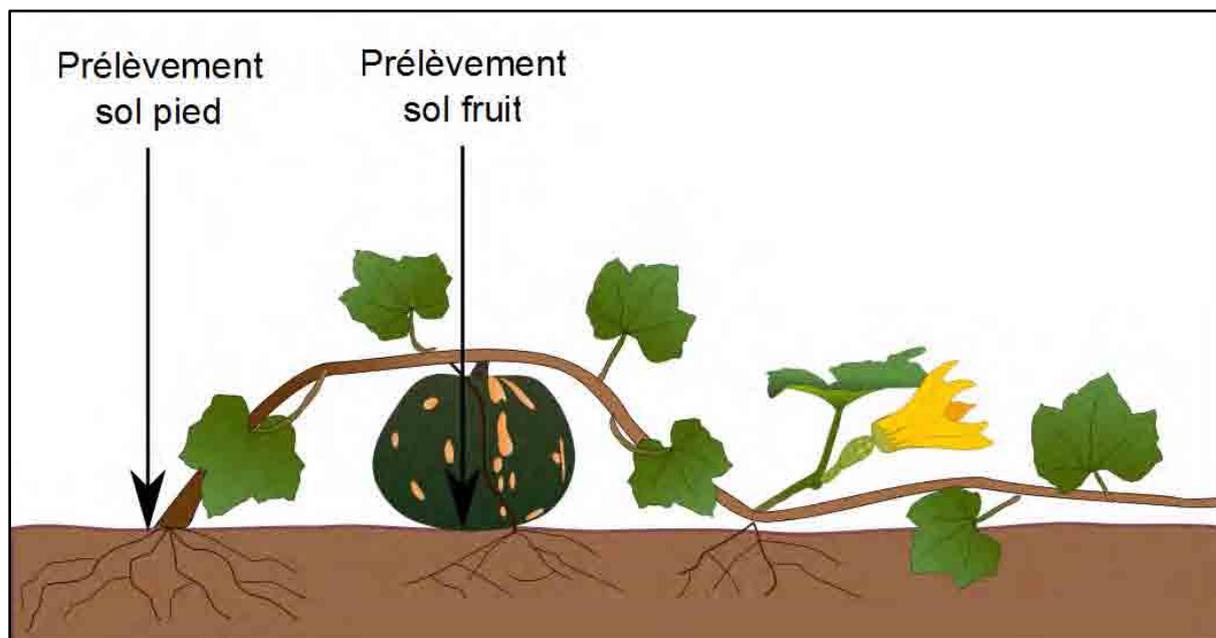


Figure 55 : Plant de giraumon et prélèvements de sol

³¹ Cf. annexe 10 : Résultats des analyses d'eau de cuisson

Les transferts étant comparables quel que soit le sol utilisé comme référence (sol pied ou sol fruit), nous ne présenterons que les résultats par rapport au prélèvement de sol effectué au niveau du pied, d'autant plus que l'hétérogénéité des résultats est supérieure lorsque nous prenons la teneur du sol au niveau du fruit comme référence.

3.3.1 Comparaison andosol et nitisol-ferrisol

Nous commençons par étudier le transfert de chlordécone sol-fruit entier.

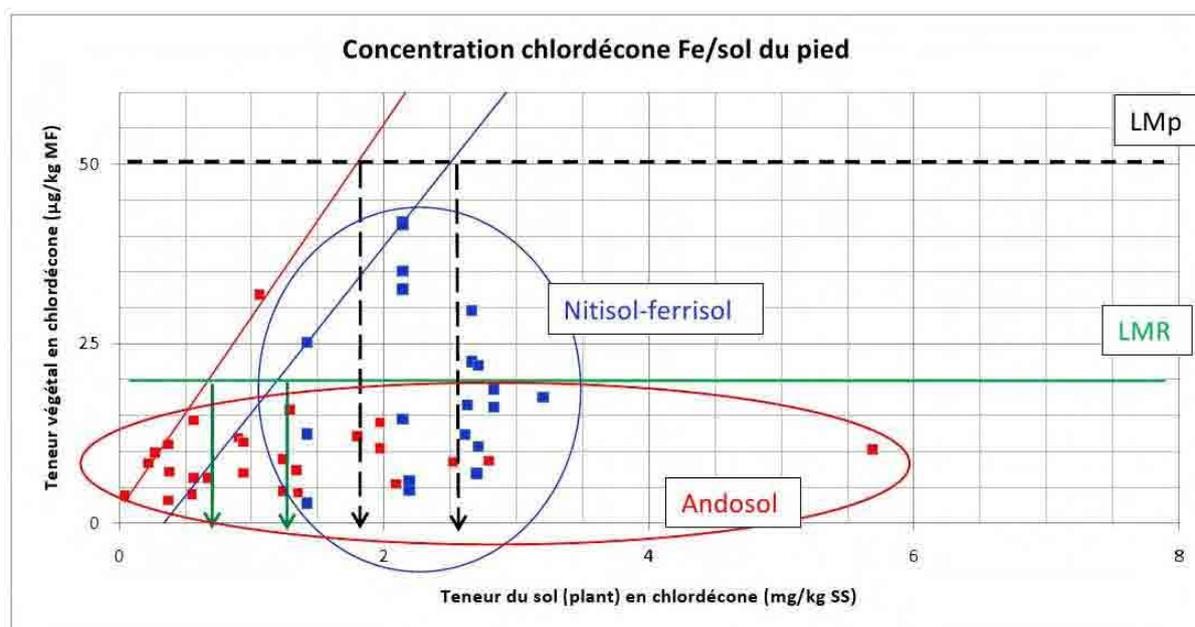


Figure 56 : Giraumon - [Fe]/[sol] sur andosol et ferrisol

Les transferts moyens ne sont pas représentés sur le graphe (Figure 56) car les coefficients de détermination sont très mauvais (inférieurs à 0.2), la courbe de tendance n'est donc pas représentative d'un comportement moyen. Il est à noter que ceci est vrai pour tous les compartiments et tous les types de sol, c'est pourquoi aucune courbe de tendance n'apparaît sur les graphiques suivants. De même, les résultats des tests de corrélation, tous négatifs, sont disponibles en annexe mais ne sont pas commentés dans ce rapport.

L'observation du graphique confirme l'hétérogénéité des teneurs en chlordécone sur la parcelle en andosol (en rouge Figure 56) alors que les résultats obtenus sur ferrisol (en bleu Figure 56) sont regroupés sur une gamme d'abscisses plus petite.

Les transferts maxima sont assez similaires sur andosol (courbe rouge, Figure 56) et ferrisol (courbe bleue, Figure 56) puisque l'écart entre les deux courbes est faible. La pente des courbes est élevée, reflet d'un transfert important de chlordécone du sol vers le fruit.

La concentration maximale du sol en deçà de laquelle, le fruit entier sera conforme est de 0.7 mg/kg sur andosol et 1.3 mg/kg sur ferrisol, ce qui est assez proche. Concernant la LMp, les teneurs maximales du sol sont de 1.8 mg/kg sur andosol et 2.5 mg/kg sur ferrisol. Habituellement, l'inverse est observé avec un transfert nettement inférieur sur andosol que sur ferrisol-nitisol. Si sur andosol, nous avons pu obtenir des données sur une large gamme de teneur de sol en chlordécone, sur ferrisol-nitisol, celle-ci est relativement réduite et pourrait être à l'origine d'une sous-estimation du transfert maximum sur ferrisol-nitisol (pas de points de prélèvement à moins de 1.4 µg/kg de SS). Des mesures sur ferrisol-nitisol moins contaminé seront nécessaires pour compléter cette analyse.

Nous nous intéressons maintenant au comportement de la peau en fonction de la teneur du sol en chlordécone (Figure 57).

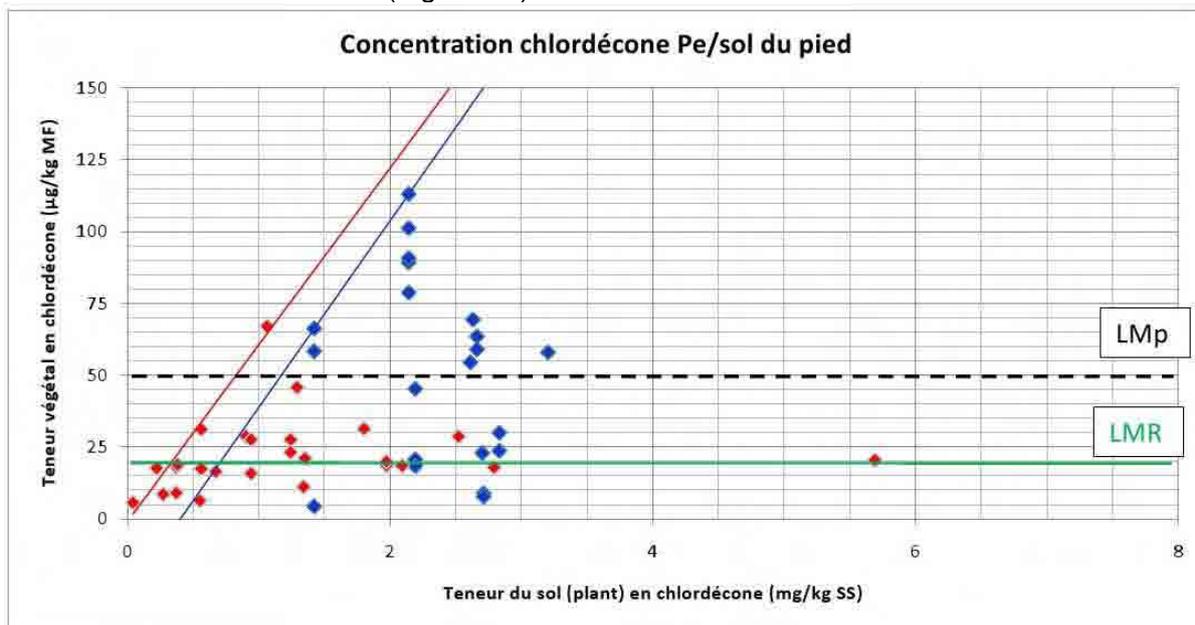


Figure 57 : Giraumon - [Pe]/[sol] sur andosol et ferrisol

Les courbes de transfert maximum sur andosol (courbe rouge Figure 57) et sur ferrisol (courbe bleue Figure 57) ont des pentes identiques et sont proches, les transferts sol-peau sont donc similaires sur ces deux types de sol.

Le risque de dépassement de LMR par la peau apparaît pour des concentrations du sol en chlordécone de 0.3 mg/kg sur andosol et 0.6 mg/kg sur ferrisol. La LMp peut elle être atteinte pour des teneurs du sol de 0.7 mg/kg sur andosol et 1.2 mg/kg sur ferrisol.

Pour finir, nous étudions les transferts de chlordécone du sol vers la pulpe.

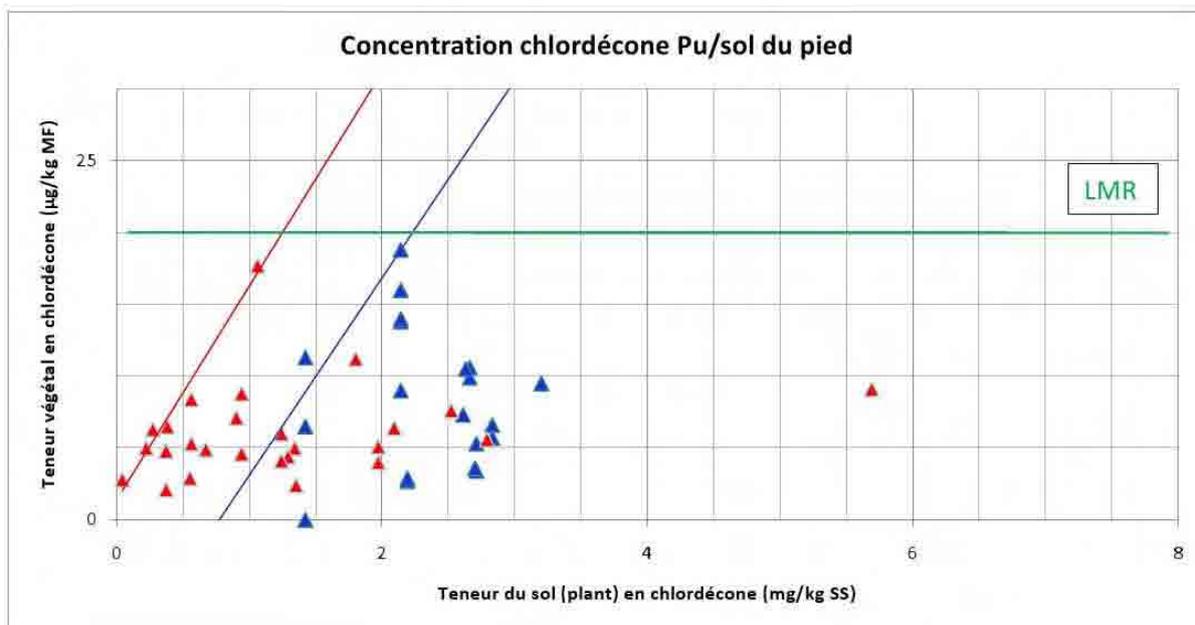


Figure 58 : Giraumon - [Pu]/[sol] sur andosol et ferrisol

Comme pour le fruit entier et la peau, les courbes de transfert maximum pour l'andosol (courbe rouge, Figure 58) et le ferrisol (courbe bleue, Figure 58) ont des pentes quasi

identiques et sont très proches. Le transfert sol-pulpe est donc le même quel que soit le type de sol.

Le risque de « non-conformité » de la pulpe apparaît pour des sols contaminés à 1.2 mg/kg de SS sur andosol et 2.2 mg/kg de SS sur ferrisol.

Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues pour le fruit entier, l'hypothèse d'un transfert privilégié vers la peau semble donc confirmée.

Nous ne calculons pas les teneurs maximales du sol relatives à la LMp afin d'éviter une extrapolation trop éloignée des valeurs dont nous disposons (pas de pulpe ayant une concentration supérieure à la LMR soit 20 µg/kg).

3.3.2 Comparaison entre compartiments

L'étude en détail des transferts maxima pour chaque compartiment et type de sol ne revêtant pas d'intérêt particulier, nous nous intéressons à la comparaison des courbes de transfert maximum obtenues sur andosol pour les trois compartiments crus (Figure 59).

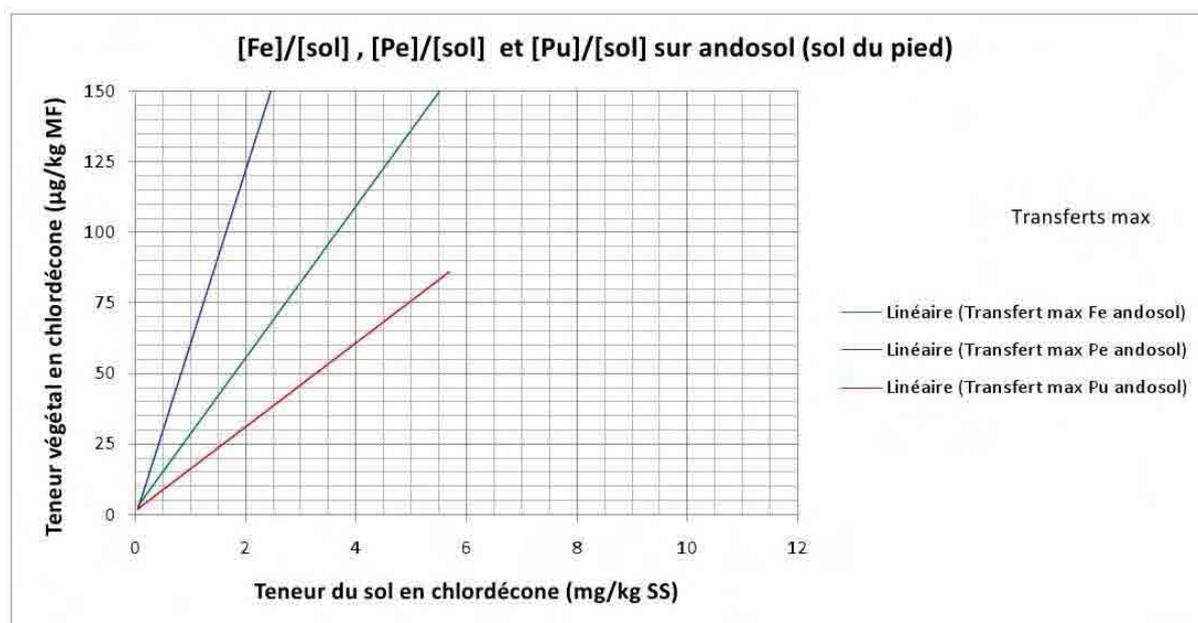


Figure 59 : Giraumon – Transfert maxima des différents compartiments sur andosol

Le transfert maximum sol-peau (courbe bleue, Figure 59) est très nettement au dessus de celle du transfert maximum sol-pulpe (courbe rouge, Figure 59), la courbe du transfert sol-fruit entier est, quant à elle, logiquement entre les deux.

Le transfert de chlordécone du sol vers la plante se fait donc de manière nettement privilégiée en faveur de la peau, compartiment en contact avec le sol et plus vascularisé que la pulpe.

Il est à noter que des résultats similaires peuvent être observés sur ferrisol-nitisol.

3.3.3 Conclusions

L'analyse des résultats d'analyses permet de conclure que le comportement des différents compartiments du fruit vis-à-vis du transfert de chlordécone est relativement similaire sur andosol et ferrisol.

D'autre part, nous observons un **transfert maximum de chlordécone du sol vers la plante, de l'ordre de 1.5% pour la pulpe, il est de près de 3% pour le fruit entier et 6% pour la peau. Ces taux sont supérieurs à ceux observés pour le concombre dont le taux de transfert maximum du sol vers le fruit entier était inférieur à 1%. Rappelons que pour les racines et tubercules, la valeur de référence du transfert maximum est 1/5 soit 20%**, nous ne sommes donc pas sur le même ordre de grandeur. La différence de comportement entre les deux cucurbitacées pourrait être expliquée, d'une part, par la durée du cycle plus longue pour le giraumon et, d'autre part, par son aptitude à émettre des racines à chaque nœud permettant ainsi de toujours limiter la distance de transport entre les racines et le fruit et donc d'avoir un transfert plus direct vers le fruit. Ces résultats sont cohérents avec la littérature et la capacité de transfert pour différentes cucurbitacées.

La complexité des transferts de chlordécone du sol vers la plante (enracinement en différents endroits au cours du cycle de développement, vascularisation différenciée et remplissage par xylème) est probablement à l'origine de la très forte hétérogénéité de comportement au sein des différents compartiments confirmée par les tests de corrélation linéaire tous négatifs.

Enfin, l'existence d'une contamination privilégiée de la peau par rapport à la pulpe est à souligner. En effet, le rapport entre le transfert maximum vers la pulpe est 4 fois moins important que celui vers la peau.

Ceci nous permet de formuler l'hypothèse d'une vascularisation préférentielle de la peau qui privilégie le transport, via la sève brute, de la chlordécone.

3.4 Résultats complémentaires « hors Jafa »

Les résultats obtenus dans le cadre du volet recherche du programme Jafa sont cohérents avec les données bibliographiques relatives au transfert sol-plantes d'organochlorés vers les différentes espèces de cucurbitacées (White JC, 2010 ; Chhikara S et al., 2010 ; White JC, 2009 ; Gent MPN et al., 2007).

Par ailleurs, pour les quelques prélèvements effectués par le Cirad dans le cadre d'un projet avec le Conseil régional de la Martinique, le transfert maximum observé sur un andosol nettement plus pollué (teneur du sol en chlordécone de l'ordre de 5 mg/kg) est plus faible mais avec des teneurs dans les fruits comparables. La teneur maximale du sol en chlordécone pour obtenir des fruits entiers conformes y est de l'ordre de 3 mg/kg de sol sec. Ce phénomène pourrait correspondre à un effet seuil de la contamination des fruits sur des sols très pollués. Néanmoins, ces résultats ne sont pas contradictoires avec ceux obtenus dans le cadre du volet recherche du programme Jafa. Il est à noter que le faible effectif de l'échantillon étudié (une dizaine de répétitions) n'est pas statistiquement représentatif étant donné l'hétérogénéité du comportement des végétaux vis-à-vis du transfert de chlordécone du sol vers la plante.

3.5 Préconisations envisagées

La contamination étant nettement plus importante pour la peau que la pulpe, **l'épluchage permet de diminuer significativement l'exposition du consommateur.** Cette pratique, associée à un nettoyage méticuleux est donc fortement à promouvoir.

Par ailleurs, au vu des taux de transfert maximum de chlordécone du sol vers les différents compartiments du fruit, il convient de préconiser **d'éviter la culture du giraumon sur les sols contaminés au-delà de 1 mg/kg** quelque soit le type de sol afin de limiter le risque de dépassement de la LMR des produits commercialisés et consommés.

4 Résultats pour la patate douce

Pour la patate douce, il nous a été possible de récolter suffisamment de plants sur les 5 parcelles mises en culture afin d'obtenir des effectifs d'échantillons représentatifs des tubercules récoltés, tout en évitant de sélectionner les patates douces présentant trop de déformations, source potentielle de résidus de sol. Nous n'avons donc pas eu besoin d'avoir recours aux patates douces récoltées sous serre, dont le développement des tubercules a été impacté, d'une part, par le confinement lié au faible volume de sol disponible dans les bacs de culture comparé aux conditions de culture au champ et, d'autre part, au fort développement des organes aériens au détriment des organes de stockage souterrains. Dans le cadre de cette étude, nous disposons de 50 répétitions (10 sur chacun des 5 dispositifs) chacun des quatre compartiments : Tubercule entier (noté Fe, Fruit entier, par cohérence avec le concombre et le giraumon), Peau (Pe), Pulpe (Pu) et Pulpe Cuite (PuC).

4.1 Ventilations des teneurs et taux de conformité

4.1.1 Ventilation des teneurs en chlordécone mesurées

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à la ventilation des teneurs des sols en chlordécone (Tableau 21). Nous disposons de données pour trois parcelles sur andosol, une sur nitisol et une sur ferrisol.

Étiquettes de lignes	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Écartype
Andosol	30	4,2	0,2	9,5	3,1
Ando3	10	0,9	0,2	1,6	0,4
Ando2	10	7,6	4,3	9,5	1,5
Ando1	10	4,0	2,3	7,5	1,7
Ferrisol+Nitisol	20	2,4	0,8	8,9	1,7
Niti	10	3,1	0,8	8,9	2,2
Ferri	10	1,6	1,2	2,0	0,2
Total général	50	3,5	0,2	9,5	2,7

Tableau 21 : Patate douce - Concentrations en chlordécone des échantillons de sol par type de sol (mg/kg SS)

Nous constatons que les teneurs moyennes observées sur les différentes parcelles d'andosol sont bien distinctes. En effet, la moyenne sur le dispositif Ando3 est de 0.9 mg/kg de SS, sur Ando1, elle est de 4 mg/kg de SS et sur Ando2 de 7.6 mg/kg de SS. Les valeurs des minima et maxima de ces dispositifs confirment cette tendance. Au sein d'une même parcelle, les écarts-types sont moyens, s'échelonnant de 20% à 45%.

De même, concernant les dispositifs sur ferrisol et nitisol, les moyennes obtenues sont bien distinctes. En revanche, pour le dispositif sur nitisol, nous obtenons un intervalle de valeurs allant de 0.8 mg/kg SS à 8.9 mg/kg SS qui englobe l'intervalle de valeurs de la parcelle de ferrisol. La parcelle de nitisol s'avère très hétérogène (écart-type de l'ordre de 70% de la moyenne) tandis que celle de ferrisol est très homogène (écart-type de l'ordre de 10%).

Globalement, tant sur andosol que sur ferrisol-nitisol, les intervalles de valeurs de sol observés s'étendent sur une gamme de teneurs de sol relativement large et continue.

Une première analyse des résultats obtenus pour les échantillons de patate douce permet de constater, d'une part, que les teneurs en chlordécone observées sont élevées et, d'autre part, qu'une fois encore les concentrations en chlordécone présentent une très forte hétérogénéité.

Nous nous intéressons dans un premier temps aux données par dispositif expérimental (5 parcelles).

Valeurs					
	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype
Andosol	120	72,0	1,3	893,1	105,4
Ando3	40	14,4	1,3	85,4	15,4
Ando2	40	146,5	21	693,1	144,2
Ando1	40	55,0	1,4	203,1	58,5
Ferrisol+Nitisol	80	78,0	5	803	124,5
Niti	40	113,2	9,5	803	164,8
Ferri	40	42,7	5	218,8	41,1
Total général	200	74,4	1,3	803	113,1

Tableau 22: Patate douce - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par parcelle ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

Nous observons, pour les parcelles sur andosol, que les concentrations moyennes en chlordécone sont bien distinctes pour chaque dispositif. Les échantillons prélevés sur la parcelle Ando3 apparaissent comme les moins fortement contaminés avec une teneur moyenne en chlordécone de $14,4 \mu\text{g}/\text{kg}$ de matière fraîche, ce qui est inférieur à la LMR ($20 \mu\text{g}/\text{kg}$ de sol sec). Ceux de Ando1 sont plus contaminés avec une moyenne de $55 \mu\text{g}/\text{kg}$, ce qui est proche de la LMP ($50 \mu\text{g}/\text{kg}$ de sol sec). Enfin, ceux de Ando2 présentent une contamination moyenne de $146,5 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF, la teneur minimale obtenue sur ce dispositif est de $21 \mu\text{g}/\text{kg}$, tous les échantillons prélevés sur cette parcelle sont donc non-conformes. La gradation des concentrations entre les différentes parcelles est confirmée par la comparaison des minima, maxima et écart-types. **Les valeurs moyennes et maxima observées sont en faveur d'une plus forte sensibilité de la patate douce au transfert de chlordécone du sol vers la plante comparée au concombre et au giraumon, étudiés précédemment.** Cela confirme les résultats obtenus dans d'autres projets.

Pour le nitisol, la concentration moyenne obtenue est de $113,2 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF, ce qui est très nettement au-dessus de la LMP. Néanmoins, les minima observés, $9,5 \mu\text{g}/\text{kg}$ de SS sur nitisol et $5 \mu\text{g}/\text{kg}$ de SS sur ferrisol, indiquent que certains échantillons sont conformes.

Concernant le ferrisol, la teneur moyenne des échantillons en chlordécone est de $42,7 \mu\text{g}/\text{kg}$, valeur du même ordre de grandeur que pour la parcelle Ando1. Or la moyenne des teneurs d'échantillons de sol prélevés est de $1,6 \text{ mg}/\text{kg}$ SS sur Ferri et de $4 \text{ mg}/\text{kg}$ SS sur Ando1, ce qui tend à confirmer que **les transferts sol-plantes sont plus importants sur ferrisol que sur andosol.**

Quels que soient le type de sol et le dispositif, les écarts-types sont de l'ordre de 100% par rapport à la moyenne ce qui est supérieur à l'hétérogénéité observée entre les teneurs de sol en chlordécone, ceci révèle l'hétérogénéité du transfert sol-plante. Celle-ci est probablement liée à l'hétérogénéité de la répartition à très petite échelle de la chlordécone dans le sol de la parcelle, ainsi qu'à l'hétérogénéité de la réponse de chaque plant.

Nous étudions maintenant les données ventilées par grand type de sol et par compartiment végétal.

	Valeurs				
	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype
Andosol	120	72,0	1,3	693,1	105,4
Fe	30	54,3	2,4	209	50,0
Pe	30	156,4	8	693,1	169,0
Pu	30	36,9	2,2	172,1	42,7
PuC	30	40,3	1,3	180,5	51,4
Ferrisol+Nitisol	80	76,0	5	803	124,5
Fe	20	53,5	21	115	32,3
Pe	20	185,0	43,7	803	219,4
Pu	20	40,3	5	157	38,1
PuC	20	53,1	7,1	183,2	55,5
Total général	200	74,4	1,3	803	113,1

Tableau 23 : Patate douce - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par compartiment végétal ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

La répartition des effectifs entre les différentes parcelles et les deux grands types de sol est assez équilibrée : 120 résultats obtenus sur andosol et 80 sur ferrisol-nitisol soit 10 répétitions pour chaque dispositif et quatre compartiments étudiés.

Les moyennes des teneurs des compartiments végétaux en chlordécone sur andosol ($72 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) et sur ferrisol-nitisol ($76 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) sont très comparables. Au vu des concentrations moyennes obtenues pour les sols ($4.2 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS pour les andosols et $2.4 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS pour les ferrisol-nitissols), cela confirme l'hypothèse d'un transfert sol-plante plus important sur ferrisol et nitisol que sur andosol.

Il est à noter la tendance des pulpes crues et cuites (teneurs moyennes autour de $40 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) à être moins contaminées en chlordécone que le tubercule entier, Fe, (teneurs moyennes autour de $54 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF). Seule la pulpe cuite sur ferrisol-nitisol (teneur de $53.1 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) apparaît être en moyenne aussi contaminée que le tubercule entier, l'étude détaillée des résultats, en 4.2 (Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au tubercule entier) et 4.3 (Transferts sol-plante), devrait apporter des éléments complémentaires.

La peau, quant à elle, présente des teneurs nettement plus élevées que les autres compartiments avec des valeurs moyennes de l'ordre de $150 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF et des maxima très élevés (700 à $800 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) même si, comme on le verra plus loin, certaines valeurs extrêmes pourraient être imputées à des résidus de terre dans les échantillons.

Les résultats par compartiment ne suivent pas une distribution de loi normale (cf. annexe 9) et sont appariés. Nous avons donc eu recours à un test de Friedman puis avons procédé à des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9).

Sur andosol, il existe une différence statistique de teneurs en chlordécone entre la peau, le fruit entier et les pulpes. En revanche, il n'existe pas de différence significative entre les teneurs observées sur pulpe crue et pulpe cuite ($p\text{-value} = 0,841$).

Sur ferrisol-nitisol, nous observons des concentrations statistiquement différentes entre la peau, d'une part, et les autres compartiments, d'autre part : fruit entier ($p\text{-value} = 0.000$), pulpe crue ($p\text{-value} < 0.0001$) et pulpe cuite ($p\text{-value} < 0.0001$).

Par ailleurs, les écart-types sont globalement comparables quels que soient le type de sol et le compartiment.

Pour les deux types de sol, la peau apparaît donc nettement plus polluée que les autres compartiments. **Il semble donc que, pour la patate douce, comme pour le giraumon, le transfert de chlordécone vers la peau soit privilégié par rapport à celui vers la pulpe** avec comme hypothèse un rôle de l'adsorption de la molécule du sol vers l'épiderme du tubercule du fait de la forte affinité de la chlordécone pour la matière organique, un transfert via les vaisseaux de xylème puis une diffusion au sein de la pulpe (cf. Figure 60).

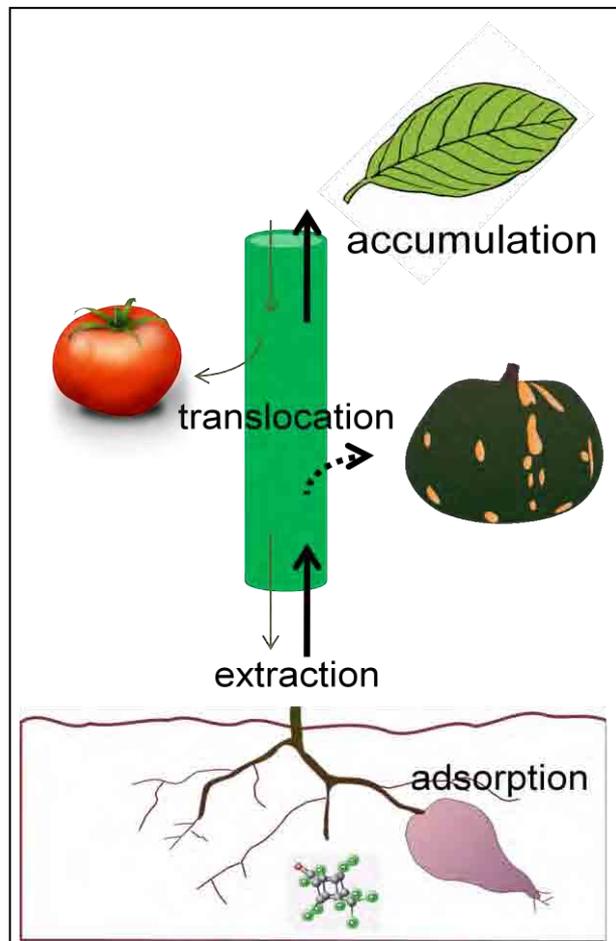


Figure 60 : Patate douce – Schéma d'adsorption et de diffusion de la molécule de chlordécone

Nous nous intéressons maintenant à la ventilation des concentrations en chlordécone dans les différents compartiments végétaux. Les tableaux 24 à 26 et les représentations graphiques correspondantes (Figure 61 à 63) présentent la répartition des concentrations en chlordécone du tubercule entier (Fe), de la peau (Pe), de la pulpe (Pu) et de la pulpe cuite (PuC).

Nous nous intéressons tout d'abord à la répartition des teneurs en chlordécone observées dans les différents compartiments, tous types de sols confondus.

Classes	Tout			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	50	50	50	50
0µg/kg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	88,0%	96,0%	72,0%	66,0%
>20µg/kg	86,0%	90,0%	56,0%	48,0%
>50µg/kg	42,0%	80,0%	32,0%	32,0%

Tableau 24 : Patate douce - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

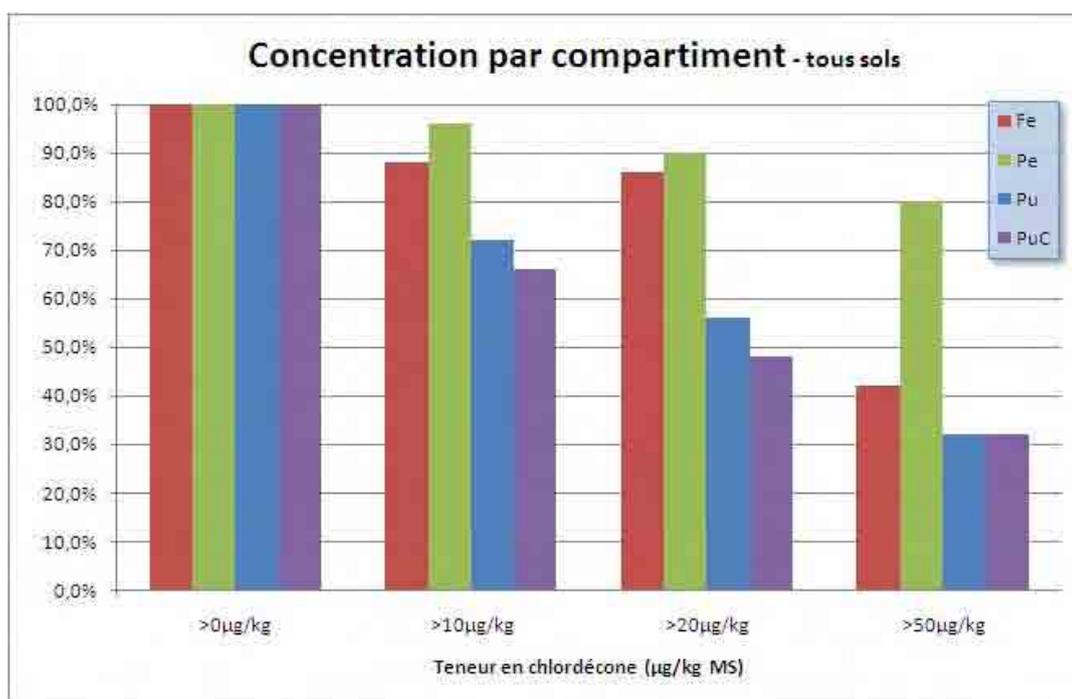


Figure 61 : Patate douce - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment (µg/kg MF)

Nous constatons que tous les échantillons prélevés ont des teneurs en chlordécone supérieures à 0 et ce, quel que soit le compartiment étudié.

Environ la moitié des pulpes crues et cuites sont conformes tandis que la quasi-totalité des tubercules entiers (86%) et des peaux (90%) sont non-conformes.

Enfin, si le dépassement de la LMp ne concerne « que » 30% des pulpes et 40% des tubercules entiers, 80% des peaux sont contaminées au-delà de 50 µg/kg de MF.

La tendance de la peau à être plus contaminée que la pulpe semble donc être confirmée par la répartition des concentrations dans les différentes classes.

Concernant l'andosol, nous obtenons les résultats suivants :

Classes	andosol			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	30	30	30	30
0µg/kg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	80,0%	93,3%	60,0%	56,7%
>20µg/kg	76,7%	83,3%	50,0%	36,7%
>50µg/kg	43,3%	70,0%	30,0%	30,0%

Tableau 25 : Patate douce - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

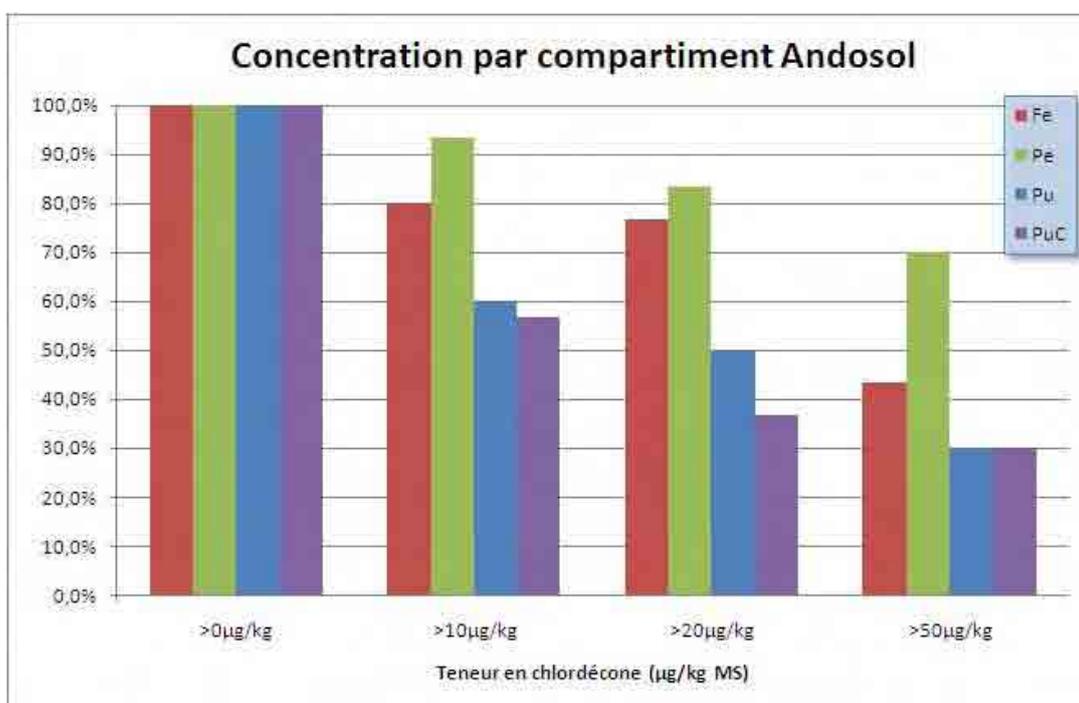


Figure 62 : Patate douce - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Sur andosol, 100% des échantillons analysés sont positifs à la recherche de chlordécone. Comme pour tous sols confondus, la peau et les pulpes présentent un comportement bien distinct. Nous observons 37% de non-conformité pour la pulpe cuite et 50% pour la pulpe crue, ce qui est légèrement en dessous des résultats tous sols confondus. D'autre part, cela laisserait penser que la pulpe cuite tend à être un peu moins souvent non-conforme que la pulpe crue, hypothèse à valider en 4.2 (Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au tubercule entier).

Les résultats sont globalement similaires à ceux obtenus tous sols confondus avec une tendance à un pourcentage de non-conformité plus faible.

Ces constatations sont en faveur de l'hypothèse d'un transfert privilégié vers la peau par rapport à la pulpe. L'analyse détaillée des résultats obtenus devrait permettre de savoir si cette hypothèse est confirmée.

Les résultats obtenus sur ferrisol-nitisol sont répartis comme suit :

Classes	nitisol et ferrisol			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	20	20	20	20
0µg/kg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	100,0%	100,0%	90,0%	80,0%
>20µg/kg	100,0%	100,0%	65,0%	65,0%
>50µg/kg	40,0%	95,0%	35,0%	35,0%

Tableau 26 : Patate douce - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur nitisol et ferrisol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

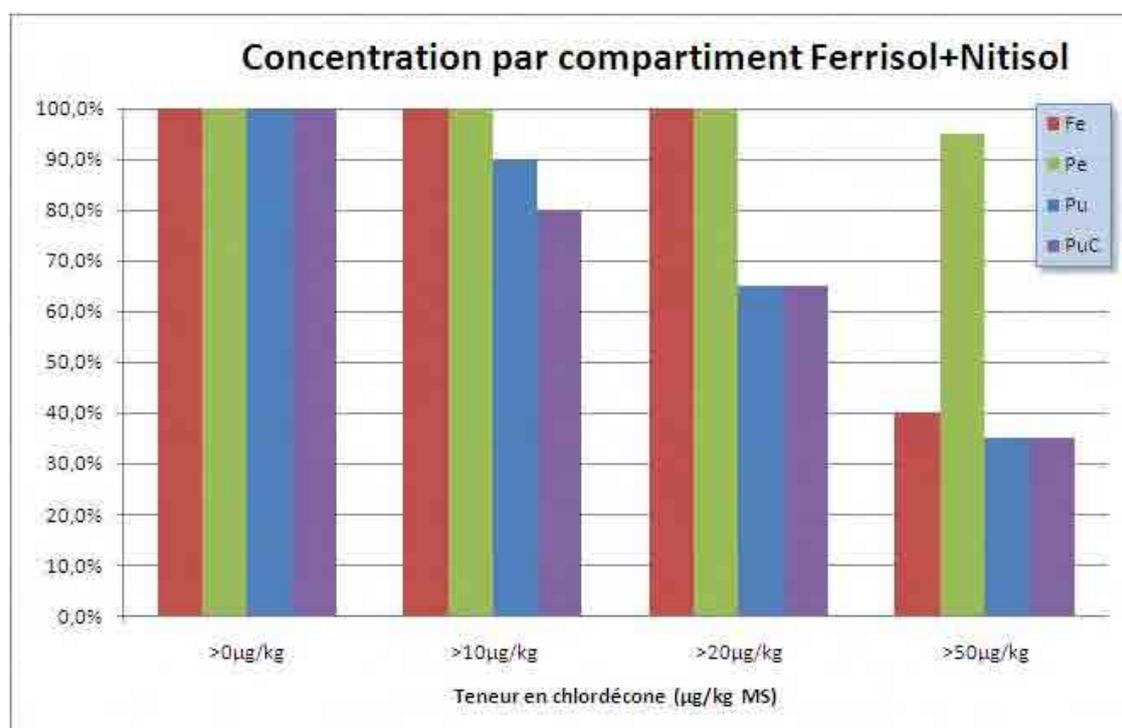


Figure 63 : Patate douce - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur nitisol et ferrisol (µg/kg MF)

Les grandes tendances observées sur ferrisol-nitisol sont les mêmes que sur andosol. Les taux de non-conformité sont néanmoins plus élevés, que ce soit pour la pulpe crue comme cuite, avec 65% d'échantillons dont la concentration en chlordécone est supérieure à 20 µg/kg de MF, ou pour les tubercules entiers et les peaux qui sont tous non-conformes. Rappelons que sur andosol ces valeurs étaient de 37% pour la pulpe cuite, 50% pour la pulpe crue et autour de 80% pour le tubercule entier et la peau. Concernant la LMp à 50 µg/kg de MF, les résultats sur andosol et ferrisol-nitisol sont quasi identiques à l'exception des peaux dont la fréquence de dépassement sur ferrisol-nitisol de cette valeur (95%) est nettement supérieure à celle observée sur andosol (70%).

4.1.2 Taux de conformité

Pour l'étude des taux de conformité obtenus, c'est-à-dire du pourcentage d'échantillons dont la concentration est inférieure ou égale à la LMR de 20 µg/kg, nous étudions tout d'abord les taux de conformité en fonction du type de sol.

Pour les ferrisols et les nitisols, tous les résultats concernent une seule parcelle, en revanche, pour les andosols, nous disposons de résultats issus de trois parcelles.

	Code exploit	Nb échant Conformes	% de conformité	Moy teneur sol (mg/kg SS)
Andosol	Ando 2	0	0%	7,6
	Ando1	15	37,5%	4,0
	Ando3	31	78%	0,9
Ferrisol+Nitisol	Nit0	2	5%	3,1
	Ferri	12	30,0%	1,6

Tableau 27 : Patate douce - Taux de conformité par type de sol

Nous constatons que les taux de conformité sont assez faibles sauf pour Ando3 dispositif pour lequel nous obtenons **78% de conformité pour une teneur moyenne du sol en chlordécone de 0.9 mg/kg de SS**. En revanche, aucun échantillon conforme n'a été prélevé sur Ando2 dont la concentration moyenne du sol en chlordécone est de 7.6 mg/kg de SS.

Afin de mieux comparer les résultats obtenus sur les deux types de sol, il est possible de les représenter graphiquement (Figure 64).

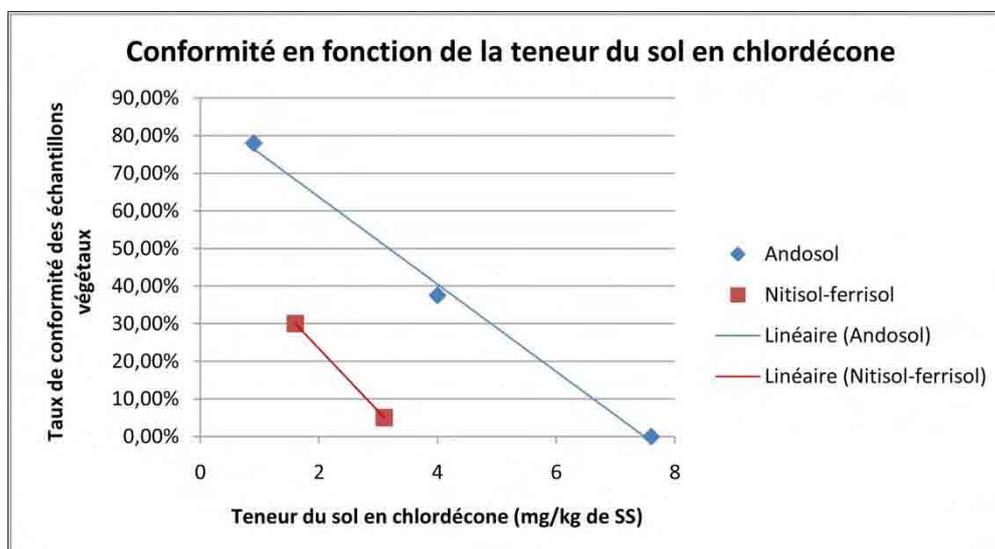


Figure 64 : Patate douce - Graphique des taux de conformité en fonction de la teneur du sol en chlordécone

Nous constatons que, sur andosol, les trois points sont bien alignés, ce qui illustre la proportionnalité entre teneur dans le sol et teneur dans le végétal. De plus, la courbe de tendance relative à l'andosol (droite bleue, Figure 64) est nettement au-dessus de celle relative au ferrisol-nitisol (droite rouge, Figure 64). A concentration en chlordécone égale dans le sol, nous observons donc un plus fort taux de conformité sur andosol que sur ferrisol-nitisol.

Le cas de la parcelle Ando3, dont la teneur moyenne du sol en chlordécone est d'environ 1 mg/kg de SS, est particulièrement intéressant. En effet, ce dispositif présente un fort taux de conformité tous compartiments confondus malgré une valeur bien supérieure à la limite actuellement admise pour la recommandation de mise en culture de racines et tubercules en vue de leur commercialisation. Nous étudions donc de façon plus détaillée les résultats obtenus sur ce dispositif.

Teneur en chld					
	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype
Ando 3	40	14,4	1,3	85,4	15,4
Fe	10	13,7	2,4	41,3	12,7
Pe	10	26,7	8	85,4	23,1
Pu	10	8,7	2,2	26,6	7,8
PuC	10	8,3	1,3	16,1	5,3
Total général	40	14,4	1,3	85,4	15,4

Tableau 28 : Patate douce - Concentration en chlordécone des échantillons végétaux sur la parcelle Ando3 (µg/kg de MF)

Sur la parcelle Ando3, la concentration maximale observée dans un tubercule entier est de 41 µg/kg de MF pour une moyenne de 14 µg/kg et 30% de non-conformité. En ce qui concerne la pulpe, un seul échantillon de pulpe crue est non-conforme avec une concentration en chlordécone de 26.6 µg/kg de MF et tous les échantillons de pulpe cuite sont conformes. Ce qui correspond pour la pulpe crue à un risque de non-conformité de 10%. Ce risque est nul pour la pulpe cuite.

Il est également à noter que, dans cette étude de cas, la probabilité de dépassement de la LMP est nulle tant pour le fruit entier que pour la pulpe.

Nous nous intéressons maintenant à la ventilation des taux de conformité par compartiment végétal ; c'est-à-dire tubercule entier (Fe), peau, pulpe (crue) et pulpe cuite. A noter que la notion de conformité n'est, réglementairement parlant, applicable qu'au tubercule entier. Néanmoins, la valeur de 20 µg/kg de MF constitue une valeur de référence et, dans le cadre de cette étude, nous utilisons donc le terme de « conformité » même pour les autres compartiments.

% <= 20µg (Fe et Pu)		Conformité	
ando	Compartiment	Total	%
Andosol	Fe	7	23%
	Pe	5	16,7%
	Pu	15	50,0%
	PuC	19	63,3%
Fermisol+Nitisol	Fe	0	0%
	Pe	0	0,0%
	Pu	7	35,0%
	PuC	7	35,0%
Total général		60	30,0%

Tableau 29 : Patate douce - Taux de conformité par compartiment

La différence de comportement entre, d'une part, le tubercule entier et la peau et, d'autre part, la pulpe et la pulpe cuite, est mise en évidence dans le tableau 29. Les premiers étant nettement moins souvent conformes que les secondes.

Ceci est clairement en faveur de l'hypothèse d'un transfert privilégié de chlordécone du sol vers la peau par rapport à la pulpe.

4.2 Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au tubercule entier et au sol

La concentration en chlordécone dans le tubercule entier, [Fe], sert de référence à la comparaison avec la concentration dans la peau, [Pe], dans la pulpe, [Pu], et dans la pulpe cuite, [PuC].

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux deux grands types de sol séparément puis nous comparerons les résultats obtenus dans la partie 4.2.3 Comparaison andosol/ferrisol-nitisol.

4.2.1 Expérimentations sur andosol

Concernant les résultats des dispositifs sur andosol, nous obtenons les résultats suivants :

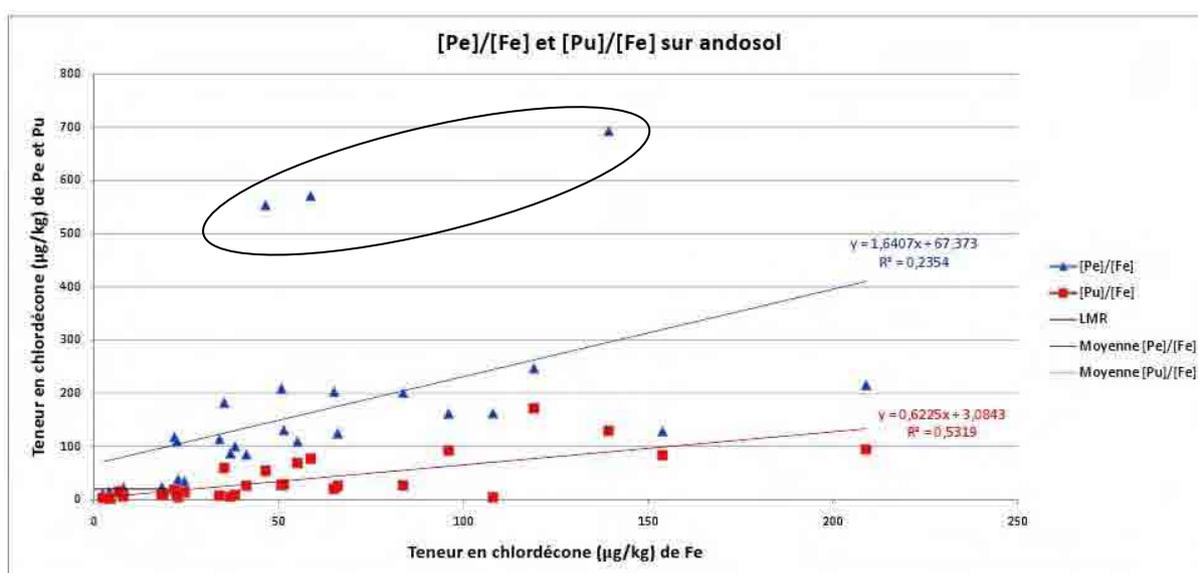


Figure 65 : Patate douce - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol

En raison de l'échelle, il est difficile d'évaluer graphiquement les pourcentages de conformité des différents compartiments. Néanmoins, il est clairement visible que certains échantillons de pulpe sont conformes, c'est-à-dire qu'ils présentent une concentration inférieure à 20 µg/kg de MF (Figure 65).

D'une manière générale, nous constatons que la courbe de tendance concernant la relation concentration de la peau / concentration du tubercule entier (courbe bleue, Figure 65) est nettement au-dessus de celle relative à la pulpe et au tubercule entier (courbe rouge, Figure 65). Les comportements de la pulpe et de la peau diffèrent donc clairement. Rappelons que, dans le cadre de cette étude, les échantillons de peau ont été obtenus par épluchage généreux (3 mm) des patates douces. **La peau est en moyenne trois à cinq fois plus contaminée que la pulpe pour la plage de données dont nous disposons. Sur andosol, le transfert de chlordécone vers la peau est donc nettement privilégié.** Ceci pourrait être expliqué par un contact prolongé avec le sol pendant le cycle de culture.

Trois points semblent aberrants (points entourés en noir Figure 65) après confirmation de leur valeur par le laboratoire. Il est probable que ces échantillons de peau aient été contaminés avec du sol. Nous verrons plus tard que certains d'entre eux restent néanmoins plausibles dans le cadre du transfert maximal.

Ces écarts permettent d'expliquer en partie le mauvais coefficient de détermination pour la relation peau/tubercule entier ($r^2=0.2$). Pour la relation pulpe/tubercule entier, le coefficient de détermination est meilleur ($r^2=0.5$). Les résultats obtenus sont donc assez hétérogènes.

Le coefficient de corrélation, quant à lui, est moyen à bon ($r=0.5$) pour la relation peau/tubercule entier et bon ($r=0.7$) pour celle pulpe/tubercule entier. Sur andosol, il existe donc une relation linéaire forte entre les concentrations dans la peau et la pulpe et celle dans le tubercule entier.

Il est à noter que, si l'on écarte les trois points graphiquement aberrants, les valeurs des coefficients (détermination et corrélation) pour la relation peau/tubercule entier sont égales à celles obtenues pour la relation pulpe/fruit entier.

4.2.2 Expérimentations sur nitisol-ferrisol

En ce qui concerne les résultats des dispositifs sur ferrisol et nitisol, nous obtenons les résultats suivants :

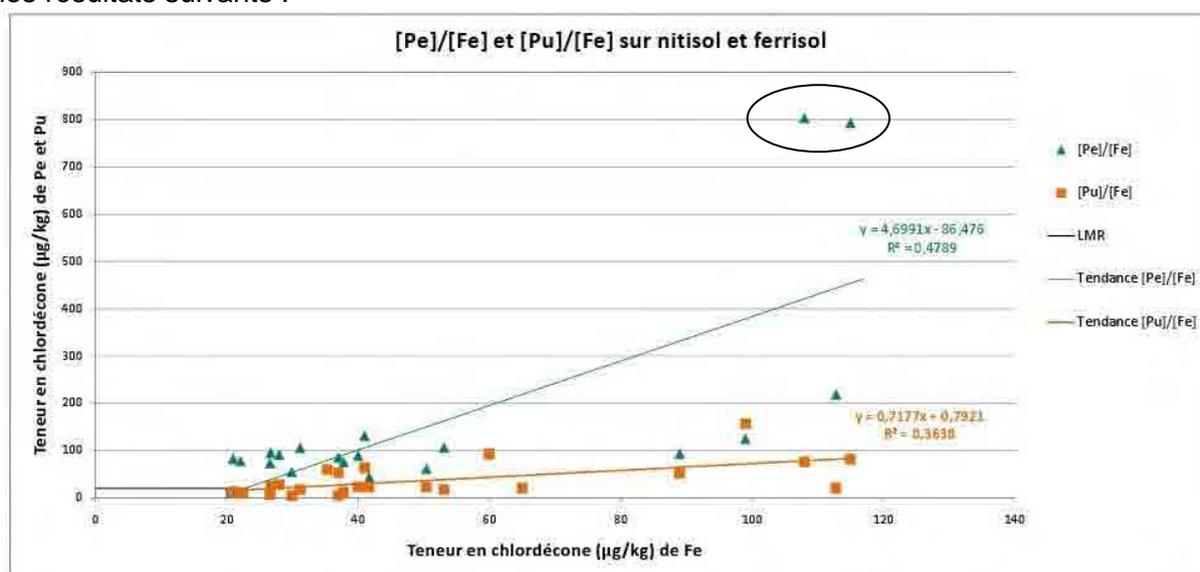


Figure 66 : Patate douce - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur ferrisol et nitisol

La lecture du graphe (Figure 66) confirme qu'aucun échantillon de peau ni de tubercule entier (Fe) de patate douce n'est conforme sur ferrisol-nitisol. En revanche, nous constatons qu'environ la moitié des échantillons de pulpe sont conformes.

La répartition des résultats concernant la relation peau/tubercule entier (points verts Figure 66) paraît assez homogène ce qui est confirmé par le coefficient de détermination ($r^2=0.48$). La présence de deux points (entourés en noir) nettement détachés du nuage de points est à noter même si, après vérification, la faible valeur du coefficient de détermination ne peut leur être imputée. L'échelle utilisée pour faire figurer les valeurs extrêmes de certaines peaux ne permet pas de bien évaluer visuellement l'hétérogénéité de la relation pulpe/tubercule entier (points orange Figure 66). Le coefficient de détermination $r^2=0.36$ indique une forte hétérogénéité.

La concentration dans la peau est liée à celle du tubercule entier par une relation linéaire forte ($r=0.7$), il en est de même pour la concentration dans la pulpe et celle du tubercule entier ($r=0.6$).

Il existe une nette différence de comportement entre la peau et la pulpe, la courbe peau/tubercule entier (courbe verte Figure 66) est nettement au-dessus de celle pulpe/tubercule entier (courbe orange Figure 66). Comme sur andosol, **le transfert de**

chlordécone est donc privilégié vers la peau. La peau semble être en moyenne 5 fois plus contaminée que la pulpe, ce qui est cohérent avec les expérimentations antérieures.

4.2.3 Comparaison andosol/ferrisol-nitisol

Nous pouvons maintenant comparer les comportements observés sur les deux types de sols :

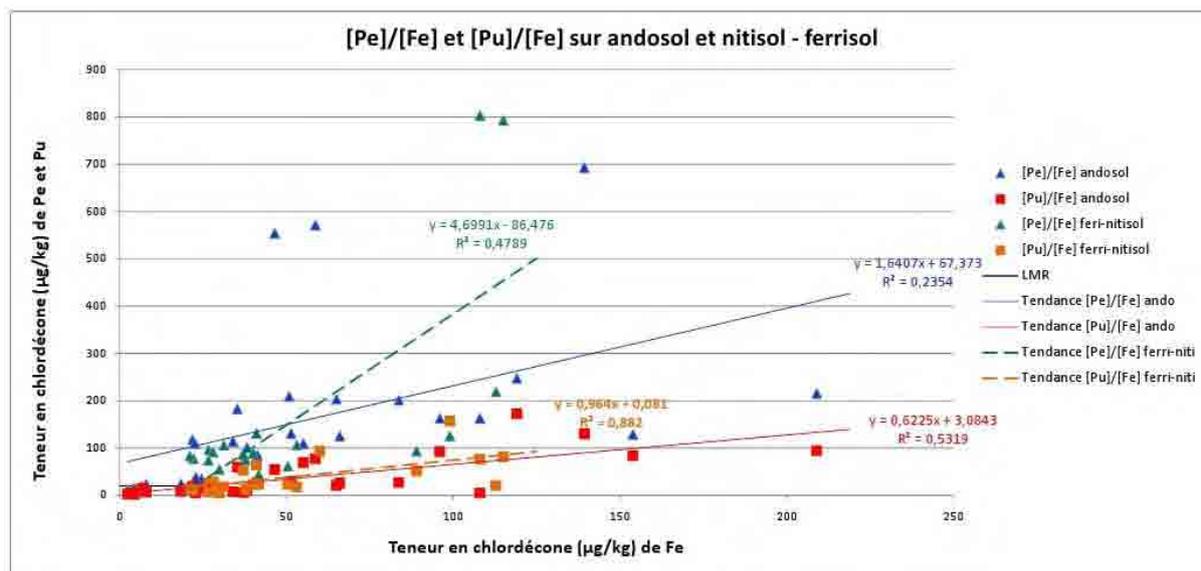


Figure 67 : Patate douce - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol et nitisol-ferrisol

Les valeurs des coefficients de détermination et de corrélation sont assez variables. Avec des relations plus fortes entre les teneurs dans la relation pulpe et tubercule entier que dans celle peau et tubercule entier. Au vu de la plus forte hétérogénéité du transfert par contact avec sol due à hétérogénéité de la répartition de la molécule dans le sol, ces résultats semblent logiques.

D'autres part, les effectifs étudiés sont représentatifs ce qui nous permet de valider statistiquement nos résultats.

Pour la pulpe, les comportements sur andosol et ferrisol-nitisol sont semblables comme le montrent les courbes [Pu]/[Fe] pour l'andosol (courbe rouge Figure 67) et pour le nitisol-ferrisol (courbe orange Figure 67) qui sont très proches.

Concernant les échantillons de peau, **le transfert privilégié vers la peau par rapport aux autres compartiments est confirmé, que ce soit sur andosol ou ferrisol-nitisol**, comme le montrent les courbes [Pe]/[Fe] pour l'andosol (courbe bleue Figure 67) et pour le nitisol-ferrisol (courbe verte Figure 67) qui sont nettement au dessus de celles relatives à la contamination de la pulpe. La comparaison de la relation peau-tubercule entier andosol et ferrisol-nitisol ne peut s'appuyer sur les courbes de tendance dans le cas de la patate douce (intersection des droites, r^2 faibles). Néanmoins, la disposition des points serait en faveur d'un comportement relativement proche.

L'étude des coefficients de corrélation tous sols confondus (cf. annexe 9) met en exergue les relations fortes entre la teneur dans la peau ($r=0.5$) et la pulpe ($r=0.7$), d'une part, et dans le tubercule entier, d'autre part. Le calcul des coefficients de détermination révèle en revanche une hétérogénéité de comportement forte pour la peau ($r^2=0.3$) et moyenne pour la pulpe ($r^2=0.5$).

4.2.4 Effet de la cuisson

Dans le cadre de ce programme de recherche, nous nous sommes également intéressés à l'impact de la cuisson sur la teneur en chlordécone de la partie consommée, la pulpe. Nous allons donc comparer les résultats obtenus pour la pulpe crue (Pu) et la pulpe cuite (PuC). Nous commençons par les données obtenues sur andosol.

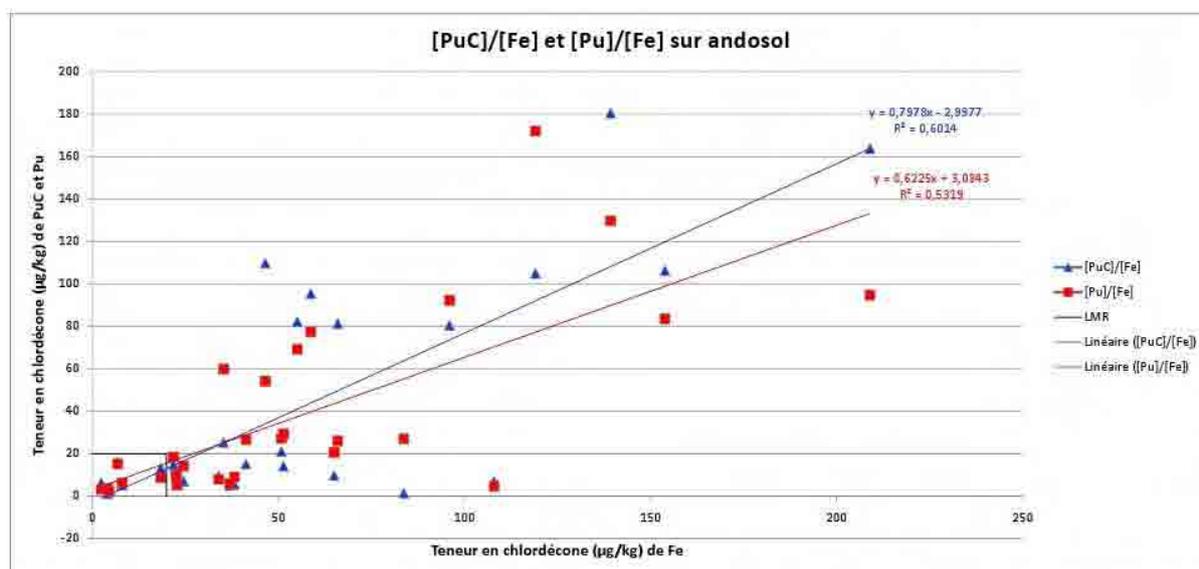


Figure 68 : Patate douce - Concentration dans Pu et PuC par rapport à [Fe] sur andosol

Sur andosol, nous constatons que les comportements de la pulpe crue (courbe rouge Figure 68) et de la pulpe cuite (courbe bleue Figure 68) par rapport au transfert de chlordécone sont relativement similaires. L'écart entre les deux courbes est faible, de l'ordre de 10-15% environ dans la gamme de concentrations pour laquelle nous avons des données ; ce qui est très nettement inférieur à l'incertitude liée aux mesures. La tendance de la pulpe cuite à être légèrement plus contaminée que la pulpe crue de l'ordre de 10% est, en effet, à relativiser au vu de l'incertitude liée aux résultats d'analyse du laboratoire qui, elle, est de l'ordre de 30%. La teneur moyenne en matière sèche des échantillons végétaux est de 31% pour la pulpe cuite et 35% pour la pulpe crue. Cette différence de teneur ne peut donc pas contribuer à l'écart de comportement des deux pulpes vis-à-vis du transfert puisque la chlordécone a plus d'affinité pour la matière sèche que pour l'eau.

La teneur en chlordécone des sous-échantillons ne suit pas une distribution de loi normale (cf. annexe 9), de plus, les populations ne sont pas indépendantes. Nous avons donc eu recours à un test de Friedman puis avons procédé à des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9).

L'étude statistique révèle que, sur andosol, il n'existe pas de différence significative entre les teneurs observées sur pulpe crue et pulpe cuite (p-value = 0,841).

L'hétérogénéité des résultats est moyenne dans le cas de la pulpe crue ($r^2=0.53$) et comme dans celui de la pulpe cuite ($r^2=0.60$). De même, les coefficients de corrélation sont très proches et ont des valeurs témoignant de la forte relation linéaire entre les concentrations dans les pulpes et dans le tubercule entier ($r=0.73$ pour la pulpe et $r=0.78$ pour la pulpe cuite).

Sur andosol, nous pouvons donc considérer qu'il n'existe pas de différence de comportement entre la pulpe crue et la pulpe cuite par rapport au transfert de chlordécone. Il n'y a donc pas d' « effet de la cuisson » de diminution d'exposition du consommateur.

Nous étudions maintenant les données obtenues sur ferrisol et nitisol pour la pulpe crue et la pulpe cuite.

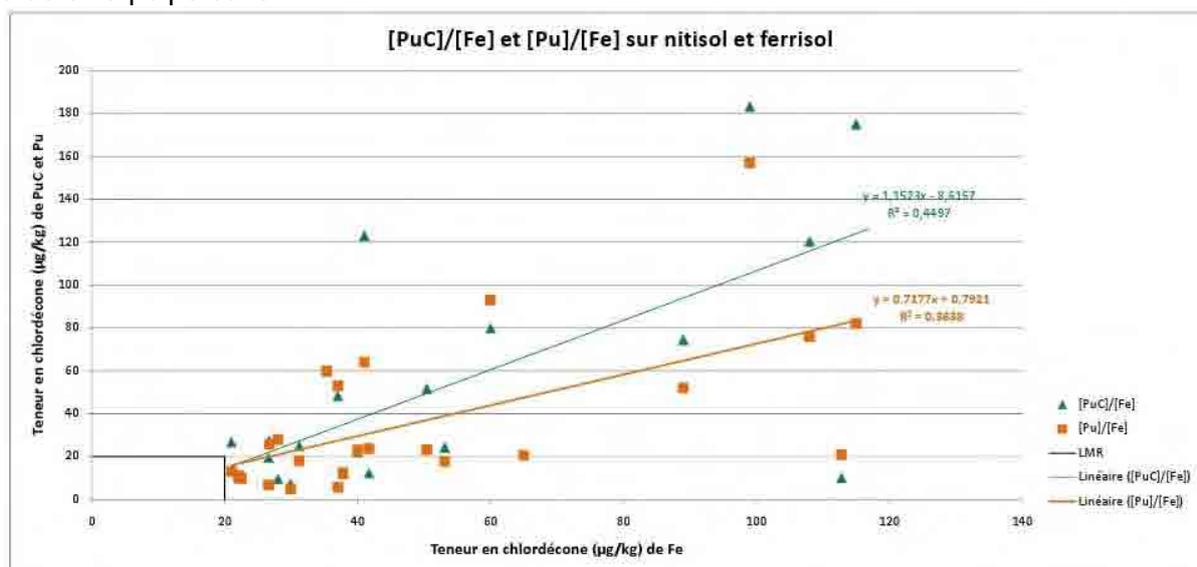


Figure 69 : Patate douce - Concentration dans Pu et PuC par rapport à [Fe] sur ferrisol et nitisol

Sur ferrisol et nitisol, l'écart entre la courbe [Pu]/[Fe] (courbe orange Figure 69) et la courbe [PuC]/[Fe] (courbe verte Figure 69) est légèrement plus important que sur andosol. Néanmoins, sur la zone pour laquelle nous disposons du plus de données (20 à 50 µg/kg de MF pour Fe), cet écart reste faible, de l'ordre de 10 à 20%.

De même que sur andosol, la pulpe cuite et la pulpe crue présentent un écart de teneur en matière sèche d'environ 10% ce qui est faible comparé à l'incertitude liée aux résultats d'analyse.

Ceci est confirmé par l'analyse statistique des résultats par test de Friedman puis comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9).

Sur ferrisol-nitisol, nous constatons que les concentrations ne sont pas statistiquement différentes entre la pulpe crue et la pulpe cuite (p-value = 0.298).

Le coefficient de détermination dans le cas de la pulpe cuite ($r^2=0.45$) est meilleur que celui pour la pulpe crue ($r^2=0.36$) mais reste du même ordre avec une hétérogénéité assez importante.

Les coefficients de détermination de la relation pulpe cuite/tubercule entier ($r=0.67$) et pulpe crue/tubercule entier ($r=0.62$) sont, quant à eux, le reflet des relations fortes.

Sur ferrisol-nitisol, la pulpe cuite et la pulpe crue ne présentent pas de différence significative de leur teneur en chlordécone. Donc, comme sur andosol, la cuisson ne modifie pas la teneur en chlordécone, ce qui est cohérent avec les propriétés de la molécule.

4.2.5 Conclusions

Concernant le compartiment pulpe, la répartition de la chlordécone dans le tubercule est du même ordre sur andosol et sur ferrisol-nitisol. Concernant la peau, la comparaison est plus difficile, mais néanmoins en faveur de comportements similaires sur les deux types de sol. La diffusion et la répartition de la chlordécone au sein du tubercule ne dépend donc pas de la nature du sol.

La différence entre les concentrations moyennes en chlordécone dans le tubercule entier et dans la pulpe est de l'ordre d'un facteur 5. La croissance de l'organe consommé

entièrement enfoui dans le sol est probablement à l'origine du **transfert nettement privilégié de chlordécone du sol vers la peau par rapport à la pulpe**. **L'épluchage du tubercule permet, dans le cas de la patate douce, de diminuer très nettement l'exposition du consommateur par rapport aux teneurs observées dans le tubercule entier.**

La pulpe présente sur andosol une teneur en chlordécone inférieure à la LMR dans 50% des échantillons étudiés dans le cadre de cette étude et ce malgré les forts niveaux de pollution des parcelles expérimentales utilisées. Ceci conduit à formuler l'hypothèse que la valeur de 0.1 mg/kg de SS du sol en chlordécone, teneur limite au-delà de laquelle la mise en culture de racines et tubercules est déconseillée, est très protectrice pour le consommateur et sécuritaire pour l'agriculteur. Sur ferrisol-nitisol, 35% des pulpes sont conformes. De plus, sur andosol comme sur ferrisol-nitisol, la majorité des échantillons de tubercule entier et de pulpe ont des concentrations en chlordécone inférieures à la LMP de 50 µg/kg de MS.

D'autre part, l'étude des résultats obtenus pour les pulpes crues et cuites indiquent que, pour la patate douce, **la cuisson n'a pas d'impact sur le niveau de contamination**. Ces résultats sont cohérents avec la faible affinité de la molécule pour l'eau par rapport à celle pour la matière organique et sa grande stabilité à la chaleur (température de minéralisation supérieure à 1000° C).

4.3 Transferts sol-plante

Nous allons maintenant nous intéresser à la relation entre concentration dans le végétal et teneur du sol en chlordécone. Concernant les pulpes, nous nous limitons à l'étude de la pulpe crue, le comportement de la pulpe cuite étant relativement similaire.

Après sélection des points pertinents, les courbes de transferts maxima obtenues passent toutes à proximité du point (0 ; 0), le choix a donc été fait de « forcer » le passage des courbes par ce point. Cela permet notamment de comparer plus facilement les pentes des courbes et donc les transferts.

4.3.1 Comparaison andosol et nitisol-ferrisol

Nous commençons par étudier le transfert de chlordécone du sol vers le tubercule entier.

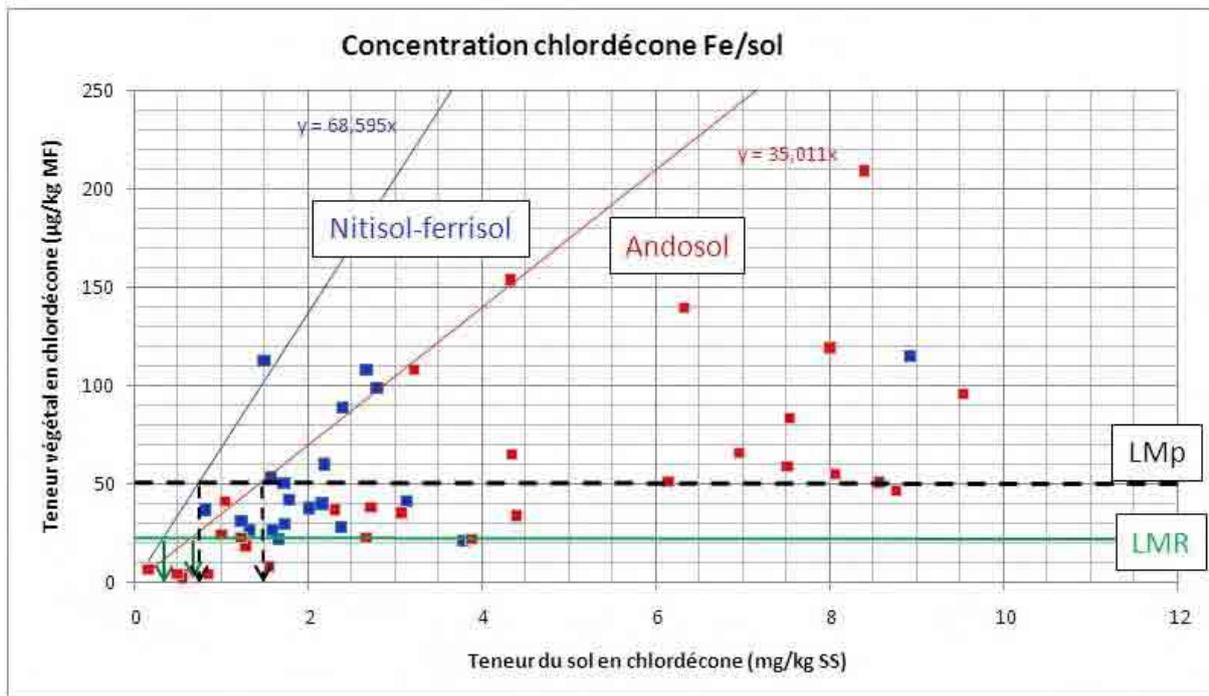


Figure 70 : Patate douce - [Fe]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Pour plus de lisibilité, seuls les transferts maxima sont représentés sur le graphique (Figure 70).

Les tests de corrélation révèlent que les coefficients de détermination sont moyens voire mauvais pour la relation tubercule entier/sol aussi bien sur andosol ($r^2=0.4$) que sur ferrisol-nitisol ($r^2=0.2$). Les valeurs des coefficients de corrélations confirment l'existence d'une proportionnalité forte sur andosol ($r=0.64$) et moyenne sur ferrisol-nitisol ($r=0.47$) entre la teneur en chlordécone du tubercule entier et celle observée dans le sol (cf. Annexe 9).

Les transferts maxima sont nettement différents sur andosol (courbe rouge, Figure 70) et ferrisol-nitisol (courbe bleue, Figure 70). La courbe relative aux données obtenues sur ferrisol-nitisol est bien au-dessus de celle concernant l'andosol. Le transfert de chlordécone du sol vers la plante est plus important sur ferrisol-nitisol que sur andosol. Ceci s'explique par une plus grande disponibilité de la molécule même pour une teneur plus faible en chlordécone. Ce phénomène est lié aux différents types d'argile présents dans les sols et à leur structure plus ou moins apte à piéger la molécule.

Globalement, la pente des courbes est élevée, reflet d'un transfert important de chlordécone du sol vers le tubercule. Sur ferrisol-nitisol ($y=69x$) le transfert maximum a une pente environ deux fois plus importante que sur andosol ($y=35x$). **Ces valeurs correspondent à des transferts de chlordécone du sol vers le tubercule entier de l'ordre de 3.5% sur andosol et 7% sur ferrisol-nitisol.** Lors du calcul du taux de transfert, il ne faut pas oublier que la teneur du sol s'exprime en mg/kg ce qui est 1000 fois supérieur à l'unité dans laquelle on exprime la concentration en chlordécone dans les végétaux, le µg/kg.

La concentration maximale du sol en deçà de laquelle, le tubercule entier sera conforme est de 0.6 mg/kg sur andosol et 0.3 mg/kg sur ferrisol-nitisol, ce qui est assez proche en termes de plage de pollution du sol. Concernant la LMp, les teneurs maximales du sol sont de 1.4 mg/kg sur andosol et 0.7 mg/kg sur ferrisol-nitisol.

Nous nous intéressons maintenant au comportement de la peau en fonction de la teneur du sol en chlordécone (Figure 71).

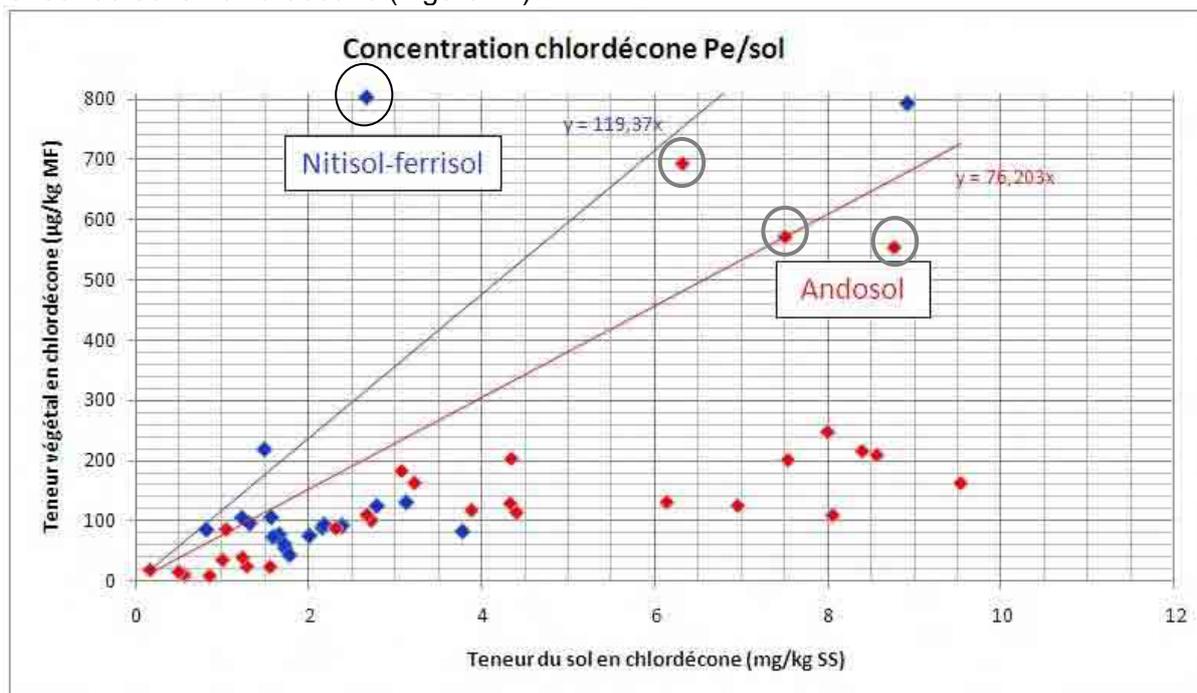


Figure 71 : Patate douce - [Pe]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Etant donné l'échelle du graphique, la LMR et la LMp ne sont pas représentées. Les concentrations maximales de sol sont obtenues non par lecture graphique mais par calcul ($y=20$ ou $y=50$).

Les coefficients de détermination des courbes de tendance révèlent une hétérogénéité assez forte à moyenne avec $r^2=0.4$ sur andosol et $r^2=0.46$ sur ferrisol-nitisol (cf. annexe 9). Les coefficients de corrélation correspondants confirment une proportionnalité forte entre les concentrations dans le sol et dans la peau quel que soit le type de sol étudié ($r=0.64$ sur andosol et $r=0.68$ sur ferrisol-nitisol).

Le transfert maximum sur ferrisol-nitisol ne tient pas compte du point entouré en noir qui se détache nettement des autres et était déjà identifié comme ayant un comportement différent du reste du nuage de points dans la Figure 66.

Entourés en gris figurent les points précédemment identifiés comme potentiellement aberrants sur andosol, le transfert maximum des échantillons cultivés sur andosol (courbe rouge Figure 71) ne tient pas compte du point à l'ordonnée la plus élevée (139.3 ; 693.1) car son comportement avait précédemment été considéré aberrant. La courbe de transfert maximum sur andosol (courbe rouge Figure 71) est nettement en-dessous de celle relative aux prélèvements sur ferrisol-nitisol (courbe bleue Figure 71). **Sur ferrisol-nitisol ($y=119x$), le transfert de chlordécone du sol vers la peau est de 12% soit environ 50% plus important que sur andosol où il est de 7.5% ($y=76x$).**

Le risque de dépassement de LMR par la peau apparaît pour des concentrations du sol en chlordécone de 0.3 mg/kg sur andosol et 0.2 mg/kg sur ferrisol, ce qui est très proche pour le pilotage des parcelles. La LMp peut elle être atteinte pour des teneurs du sol de 0.7 mg/kg sur andosol et 0.4 mg/kg sur ferrisol, teneurs assez proches.

Pour finir, nous étudions les transferts de chlordécone du sol vers la pulpe qui est le compartiment consommé.

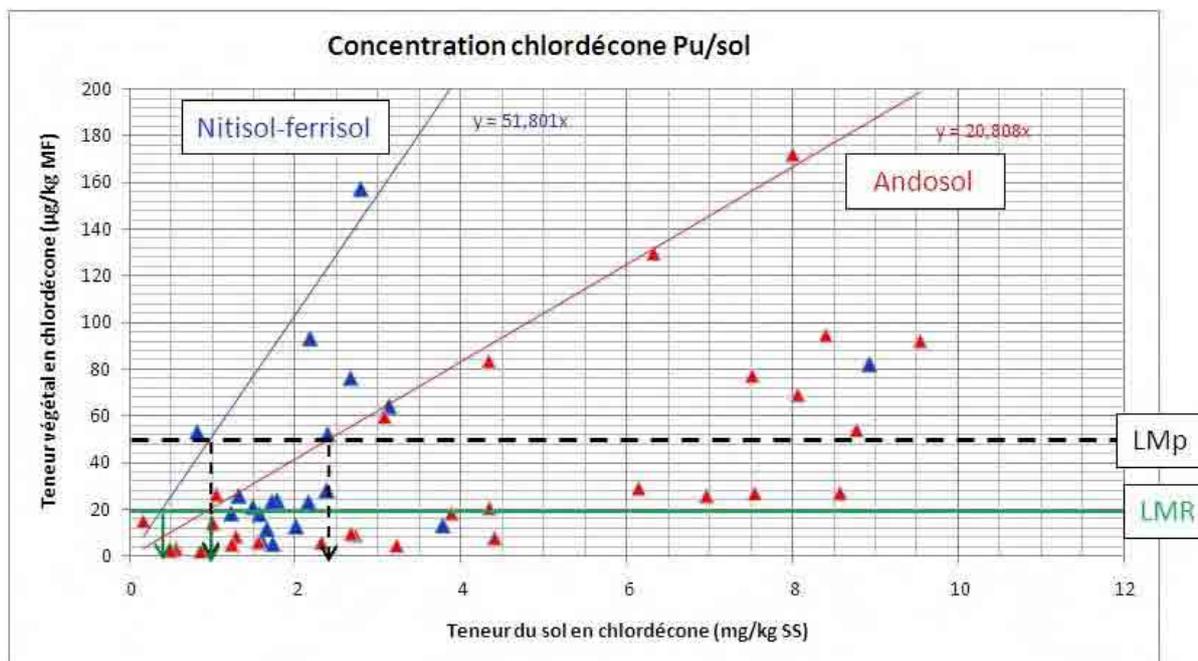


Figure 72 : Patate douce - [Pu]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Nous constatons visuellement la forte hétérogénéité des résultats en particulier sur ferrisol-nitisol. Ceci est confirmé par le très faible coefficient de détermination, $r^2=0.14$ (cf. Annexe 9). La valeur du coefficient de corrélation n'est, quant à elle, pas différente de 0 à un niveau de signification $\alpha=0.05$. La proportionnalité entre les concentrations en chlordécone dans la pulpe et dans le sol n'est donc pas vérifiée sur ferrisol-nitisol. Une étude séparée des résultats obtenus sur ferrisol et sur nitisol permet de constater que cette très forte hétérogénéité est imputable aux données relatives au ferrisol. En effet, pour le nitisol seul, le coefficient de détermination a une valeur de 0.46 tandis qu'elle est de 0.13 sur ferrisol. De même, l'existence d'une proportionnalité entre la concentration dans la pulpe et la teneur du sol en chlordécone est confirmée sur nitisol mais pas sur ferrisol. L'absence de corrélation linéaire sur ferrisol est probablement imputable au faible intervalle de valeur des teneurs de sol en chlordécone sur cette parcelle (1.2 à 2 mg/kg de S) associé à l'incertitude des résultats d'analyse des laboratoires (30%) qui aboutit à obtenir graphiquement un « effet cheminée » des points.

Sur andosol, l'hétérogénéité est assez importante ($r^2=0.44$) et la relation linéaire entre les concentrations du sol et de la pulpe est forte ($r=0.67$).

Comme pour le tubercule entier et la peau, la courbe de transfert maximum pour l'andosol (courbe rouge, Figure 72) est nettement en dessous de celle pour le ferrisol (courbe bleue, Figure 72). Le transfert sol/pulpe sur ferrisol-nitisol est de l'ordre de 5% ($y=52x$) tandis que, sur andosol, il est de l'ordre de 2% ($y=20x$). Comme pour le tubercule entier, le transfert sol-pulpe est donc deux fois plus important sur ferrisol-nitisol que sur andosol.

Le risque de « non-conformité » de la pulpe apparaît pour des sols contaminés à 1 mg/kg de SS sur andosol et 0.4 mg/kg de SS sur ferrisol-nitisol. Le risque de dépassement de la LMP apparaît pour des teneurs du sol en chlordécone de 2.5 mg/kg de SS sur andosol et 1 mg/kg de SS sur ferrisol-nitisol.

4.3.2 Comparaison entre compartiments

L'étude en détail des transferts maxima pour chaque compartiment et type de sol ne revêtant pas d'intérêt particulier, nous nous intéressons à la comparaison des courbes de transfert maximum obtenues sur andosol pour les trois compartiments (Figure 73).

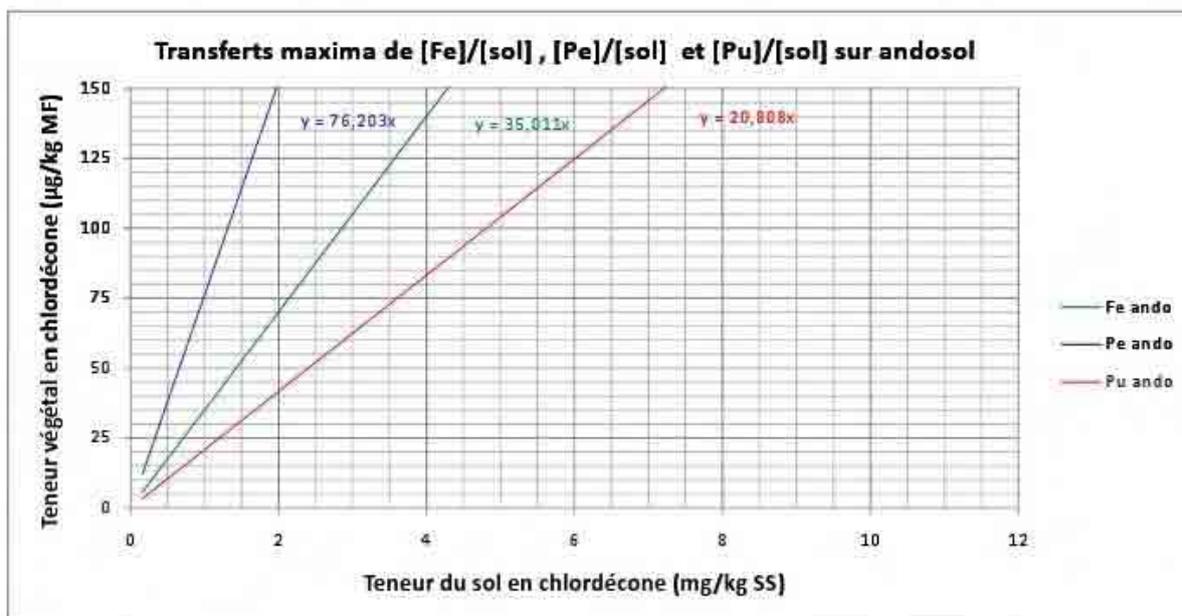


Figure 73 : Patate douce – Transferts maxima des différents compartiments sur andosol

Le transfert maximum sol-peau (courbe bleue, Figure 73) est très nettement au dessus de celle du transfert maximum sol-pulpe (courbe rouge, Figure 73), la courbe du transfert sol-tubercule entier (courbe verte, Figure 73) se situe, quant à elle, logiquement entre les deux. Nous constatons qu'il existe un coefficient multiplicateur proche de deux que ce soit entre les transferts maxima sol-tubercule entier et sol-pulpe ou entre les transferts sol-peau et sol-tubercule entier. En effet, ces transferts maxima sont de l'ordre de 2% pour la pulpe, 3.5% pour le tubercule entier et 7.6% pour la peau.

Dans le cas de la patate douce, le transfert de chlordécone du sol vers la plante se fait donc de manière nettement privilégiée en faveur de la peau, compartiment en contact avec le sol.

Sur ferrisol-nitisol (Figure 74), des résultats similaires peuvent être observés avec des taux de transferts différents.

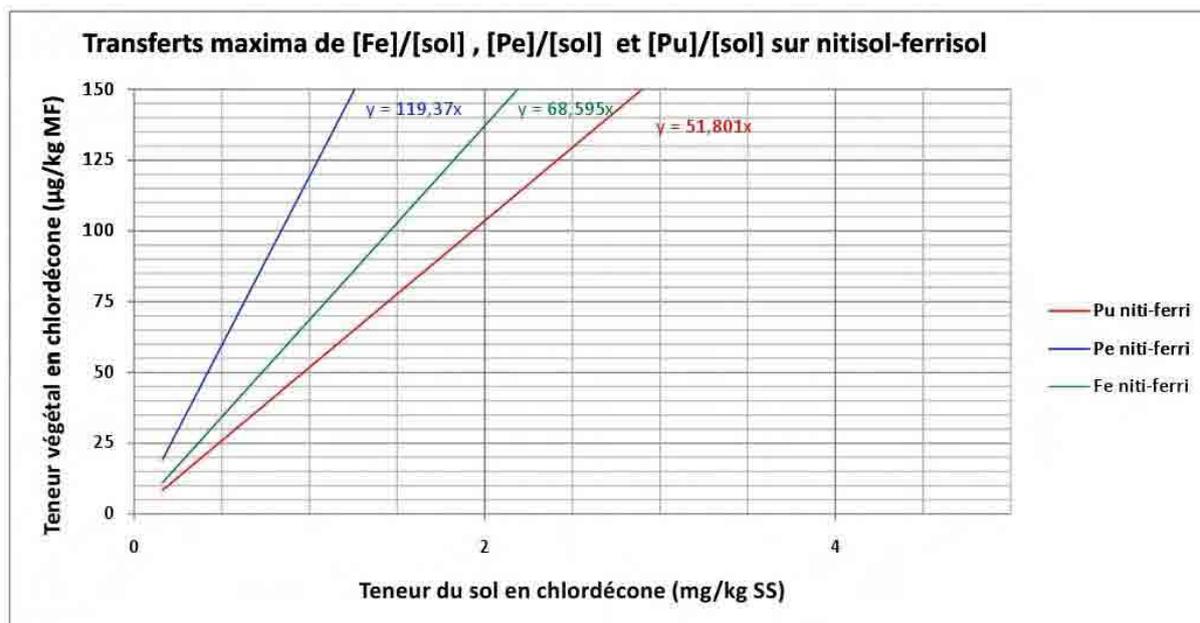


Figure 74 : Patate douce – Transferts maxima des différents compartiments sur ferrisol-nitisol

Sur ferrisol-nitisol, les taux de transferts maxima sont supérieurs à ceux observés sur andosol néanmoins, **l'existence d'un transfert privilégié vers la peau par rapport à la pulpe est confirmée.**

Les transferts maxima obtenus dans le cadre de cette étude sur sols très contaminés par la chlordécone sont :

- 5% du sol vers la pulpe,
- 7% du sol vers le tubercule entier,
- 12% du sol vers la peau.

4.3.3 Conclusions

L'étude des données obtenues sur patate douce permet de conclure que le comportement des différents compartiments du tubercule vis-à-vis du transfert de chlordécone diffère sur andosol et ferrisol. Même si les tendances restent les mêmes, les valeurs limites, elles, sont différentes. Comme le montre le Tableau 30, le **transfert sol-plante est plus important sur ferrisol-nitisol que sur andosol.**

	Andosol		Ferrisol-nitisol	
	Transfert moyen	Transfert maximum	Transfert moyen	Transfert maximum
Peau	$y=35,5x$	$y=76,2x$	$y=75,8x$	$y=119,4x$
Tubercule entier	$y=12x$	$y=35x$	$y=18,1x$	$y=68,6x$
Pulpe	$y=9x$	$y=20,8x$	$y=14,2x$	$y=51,8x$

Tableau 30 : Patate douce – Equation des droites de transferts moyen et maximum par type de sol et compartiment

Dans le Tableau 30, les droites de transfert moyen (tendance) et de transfert maximum ont été forcées par l'origine afin de rendre compte de la proportionnalité entre teneur dans le sol et dans les compartiments de la plante et pouvoir en déduire les taux de transferts. Ce tableau récapitulatif permet d'illustrer les grandes tendances observées :

Transfert andosol >> transfert ferrisol-nitisol
Transfert peau >> transfert tubercule entier >> transfert pulpe
Transfert maximum >> transfert moyen

Sur andosol, nous observons un **transfert maximum de chlordécone du sol vers la plante, de l'ordre de 2% pour la pulpe, il est de 3.5% pour le tubercule (fruit entier) et 7.6% pour la peau**. Ces taux sont relativement similaires à ceux observés sur giraumon tous sols confondus.

Sur ferrisol-nitisol, les transferts de chlordécone sont de 5% du sol vers la pulpe, 7% du sol vers le tubercule et de 12% du sol vers la peau, ce qui est environ deux fois supérieur aux transferts observés sur andosol. Pour la patate douce, sur ferrisol-nitisol, les transferts sont deux fois plus importants que pour le giraumon, ce qui est cohérent avec le fait que l'organe consommé pousse entièrement dans le sol pollué, maximisant ainsi la surface de transfert par contact.

Même sur ferrisol-nitisol, ces résultats sont nettement inférieurs à la valeur de référence de 20% généralement admise pour le transfert maximum sol-plante des racines et tubercules. Cette valeur ayant été calculée toutes cultures souterraines sensibles confondues.

Enfin, l'existence d'une contamination privilégiée de la peau par rapport à la pulpe est à souligner. En effet, le taux de transfert maximum vers la pulpe est quatre fois moins important que celui vers la peau sur andosol et plus de deux fois moins important sur ferrisol-nitisol.

La finesse de la « peau » de la patate douce par rapport au dachine et à l'igname pourrait avoir une influence sur le transfert de chlordécone par contact du sol et la diffusion au sein de la plante, il sera intéressant de comparer les résultats obtenus pour les 3 racines et tubercules étudiés dans le cadre de ce projet.

4.4 Préconisations envisagées

La contamination étant nettement plus importante pour la peau que la pulpe, **l'épluchage permet de diminuer significativement l'exposition du consommateur**. Cette pratique, associée à un nettoyage méticuleux est donc à privilégier par rapport à celle de peler le tubercule une fois cuit. On évitera de peler la patate douce après cuisson et on préférera un épluchage de plus de 2 mm. La cuisson n'ayant pas d'effet sur l'exposition du consommateur, il est important d'éviter toute cuisson prolongée qui dénature les qualités nutritionnelles des produits.

Par ailleurs, au vu des taux de transfert maximum de chlordécone du sol vers les différents compartiments du tubercule, il convient de préconiser **d'éviter la culture de patate douce sur les sols contaminés au-delà de 0.3 mg/kg** quel que soit le type de sol afin de limiter le risque de dépassement de la LMR des produits commercialisés et consommés.

Ce résultat est moins limitant que la limite de 0.1 mg/kg de sol sec généralement admise d'autant plus que si l'on s'intéresse à la partie consommée, c'est-à-dire à la pulpe, la limite passe alors à 1 mg/kg de SS pour les ferrisol-nitissols et 2.5 mg/kg de SS pour les andosols. Cette situation de pollution concerne très peu de jardins, donc, pour la majorité des consommateurs, l'exposition via l'ingestion de patate douce est relativement limitée.

5 Résultats pour le dachine

Concernant les essais menés sur dachine, il nous a été impossible de récolter sur l'une des parcelles d'andosol (Ando 1). D'autre part, les racines récoltées sur la parcelle de nitisol étaient peu développées et avaient subi des attaques de ravageurs, nous avons donc fait le choix de ne retenir que cinq échantillons issus de cette parcelle dans le cadre de cette étude.

Nous avons constitué 35 échantillons de dachine pour chacun des quatre compartiments : Tubercule entier (noté Fe, Fruit entier, comme pour la patate douce), Peau (Pe), Pulpe (Pu) et Pulpe Cuite (PuC). Les dachines étudiés proviennent de deux parcelles d'andosol (Ando2 et Ando3) et des parcelles de ferrisol et nitisol.

5.1 Ventilations des teneurs et taux de conformité

5.1.1 Ventilation des teneurs en chlordécone mesurées

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à la ventilation des teneurs des sols en chlordécone (Tableau 31). Nous disposons de données pour deux parcelles sur andosol, une sur nitisol et une sur ferrisol.

Étiquettes de lignes	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Écartype
Andosol	20	4,8	0,7	9,5	3,4
Ando3	10	1,7	0,7	5,9	1,6
Ando2	10	7,9	6,0	9,5	1,2
Ferrisol+Nitisol	15	2,0	1,0	2,8	0,5
Niti	5	1,5	1,0	1,6	0,3
Ferri	10	2,2	1,7	2,8	0,4
Total général	35	3,6	0,7	9,5	2,9

Tableau 31 : Dachine - Concentrations en chlordécone des échantillons de sol par type de sol (mg/kg SS)

Nous constatons que les teneurs moyennes observées sur les deux parcelles d'andosol sont nettement différentes. En effet, la teneur moyenne en chlordécone sur le dispositif Ando3 est de 1.7 mg/kg de SS ce qui est considéré comme faible dans le cadre de cette étude et sur Ando2, elle est de 7.9 mg/kg de SS ce qui est une valeur élevée. Les valeurs des minima et maxima de ces dispositifs confirment cette tendance. Au sein de la parcelle Ando3, l'écart-type est de l'ordre de 100% tandis qu'il est de l'ordre de 15% seulement sur Ando2, parcelle particulièrement homogène en termes de concentration de chlordécone dans le sol.

Pour les dispositifs sur ferrisol et nitisol, les moyennes obtenues sont beaucoup plus proches : 1.5 mg/kg de SS pour le nitisol et 2.2 mg/kg de SS pour le ferrisol. Pour les deux parcelles, les intervalles de valeurs sont assez faibles ce qui est cohérent avec la relativement bonne homogénéité des teneurs en chlordécone obtenues (écart-type de l'ordre de 20% de la moyenne).

Au vu de ces premiers éléments, nous pouvons craindre que sur, ferrisol-nitisol, la gamme de teneurs du sol (1 à 2,8 mg/kg de SS), relativement restreinte, rende plus difficile l'établissement du transfert maximum.

Nous nous intéressons dans un premier temps aux données par dispositif expérimental (quatre parcelles : deux andosols, un ferrisol et un nitisol).

Valeurs					
	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype
Andosol	80	158,0	7,2	929,7	188,8
Ando3	40	54,1	7,2	150,4	37,0
Ando2	40	261,8	18,3	929,7	220,7
Ferralsol/Nitisol	60	256,4	87,8	663,7	128,5
Niti	20	256,7	115,6	663,7	137,1
Ferri	40	220,2	87,8	624,6	120,9
Total général	140	189,9	7,2	929,7	168,6

Tableau 32: Dachine - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par parcelle ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

Sur les parcelles d'andosol, des concentrations moyennes en chlordécone bien distinctes pour chaque dispositif sont observées. Les échantillons prélevés sur la parcelle Ando3 sont les moins fortement contaminés avec une teneur moyenne en chlordécone de $54.1 \mu\text{g}/\text{kg}$ de matière fraîche, ce qui est néanmoins nettement supérieur à la LMR et proche de la LMP fixée par les autorités de santé. Ceux de Ando2 sont beaucoup plus contaminés avec une concentration moyenne de $261.8 \mu\text{g}/\text{kg}$ et un minimum de $18.3 \mu\text{g}/\text{kg}$, déjà proche de la LMR. Ceci est cohérent avec les teneurs moyennes du sol observées sur ces deux parcelles : $1.7 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS pour Ando3 et 7.9 pour Ando2 mg/kg de SS.

Sur nitisol, la concentration moyenne obtenue est de $256.7 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF, ce qui est une valeur très élevée, comparable aux valeurs obtenues pour Ando2.

Concernant le ferrisol, la teneur moyenne des échantillons en chlordécone est de $220.2 \mu\text{g}/\text{kg}$, valeur du même ordre de grandeur que pour les deux parcelles précédentes.

Les écarts-types sont de l'ordre de 50% par rapport à la moyenne sur Ando3, Niti et Ferri et de 100% sur Ando2. Ceci est surprenant au regard de l'hétérogénéité observée entre les teneurs de sol en chlordécone sur andosol ; en effet, la parcelle Ando3 présente une hétérogénéité relative plus importante qu'Ando2.

Les valeurs moyennes et maximales observées seraient en faveur d'une plus forte sensibilité du dachine au transfert de chlordécone du sol vers la plante comparée au concombre et au giraumon mais également à la patate douce. Cette hypothèse reste à vérifier ou infirmer par l'analyse des données.

La moyenne des teneurs des compartiments végétaux en chlordécone sur Ando3 ($54.1 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) est très nettement inférieure à celle sur nitisol ($256.7 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF). Au vu des concentrations moyennes très proches obtenues pour les sols ($1.7 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS pour Ando3 et $1.5 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS pour Niti), l'hypothèse d'un transfert sol-plante plus important sur nitisol que sur andosol est confirmée.

Nous étudions maintenant les données ventilées par grand type de sol et compartiment végétal.

	Valeurs				
	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype
Andosol	80	189,9	7,2	929,7	168,6
Fe	20	109,7	18,3	299,4	81,2
Pe	20	333,0	30,2	929,7	295,2
Pu	20	89,1	15,3	202,1	67,5
PuC	20	100,2	7,2	313,6	81,6
Ferrisol+Nitisol	60	220,4	87,8	663,7	126,5
Fe	15	220,9	97,8	335,7	73,4
Pe	15	376,3	203,6	663,7	157,5
Pu	15	178,5	104	307,3	60,5
PuC	15	153,9	87,8	223,2	40,1
Total général	140	189,9	7,2	929,7	168,6

Tableau 33 : Dachine - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par compartiment végétal ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

La répartition des effectifs entre les différentes parcelles et les deux grands types de sol est assez équilibrée : 80 résultats obtenus sur andosol et 60 sur ferrisol-nitisol soit quatre compartiments étudiés et 10 répétitions sur chaque parcelle d'andosol et de ferrisol, cinq répétitions sur nitisol.

L'étude des concentrations moyennes observées dans les différents compartiments permet de constater que la peau est en moyenne nettement plus contaminée que les autres compartiments que ce soit sur andosol (333 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MF pour Pe et 109,7 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MF pour Fe) ou sur ferrisol-nitisol (376,3 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MF pour Pe et 220,9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MF pour Fe). Les teneurs minimales et maximales des compartiments confirment cette tendance.

En outre, il est à noter les valeurs très élevées des teneurs maximales en chlordécone de la peau : 663,7 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MF sur ferrisol-nitisol et 929,7 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MF sur andosol.

Comme pour la patate douce, les résultats par compartiment ne suivent pas une distribution de loi normale (cf. annexe 9) et sont appariés. Nous avons donc eu recours à un test de Friedman puis avons procédé à des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9).

L'analyse statistiques des moyennes révèle, sur andosol, qu'il existe une différence statistique de teneurs en chlordécone entre la peau et les autres compartiments : le fruit entier (p-value=0.001), la pulpe crue (p-value<0.0001) et la pulpe cuite (p-value<0.0001).

Sur ferrisol-nitisol comme sur andosol, nous constatons que les concentrations sont statistiquement différentes entre la peau et les autres compartiments : fruit entier (p-value = 0.024), pulpe crue (p-value < 0.0001) et pulpe cuite (p-value < 0.0001).

Pour les deux types de sol, la peau apparaît donc nettement plus contaminée que les autres compartiments. **Il semble donc que, pour le dachine, comme pour les cultures précédemment étudiées, le transfert de chlordécone vers la peau soit privilégié par rapport à celui vers la pulpe.**

Pulpes crues et cuites ont des teneurs moyennes similaires surtout en tenant compte de la marge d'erreur des valeurs fournies par le laboratoire d'analyse. L'hypothèse selon laquelle la cuisson n'a pas ou peu d'effet sur la teneur de la pulpe en chlordécone sera étudiée plus loin dans ce rapport (5.2.2 Effet de la cuisson).

Par ailleurs, nous constatons que, quel que soit le compartiment, il n'y a aucune teneur conforme sur ferrisol-nitisol ni même inférieure à la LMP et peu sur andosol au vu des minima et moyennes obtenues.

L'étude de la ventilation des concentrations en chlordécone dans les différents compartiments végétaux ne présente donc pas d'intérêt sur ferrisol. Nous nous intéressons donc uniquement aux résultats relatifs à l'andosol.

Le tableau suivant et la représentation graphique correspondante présentent la répartition des concentrations en chlordécone du tubercule entier (Fe), de la peau (Pe), de la pulpe (Pu) et de la pulpe cuite (PuC) sur andosol :

Classes	andosol			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	20	20	20	20
0µg/kg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	95,0%
>20µg/kg	95,0%	100,0%	95,0%	80,0%
>50µg/kg	60,0%	90,0%	55,0%	65,0%

Tableau 34 : Dachine - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

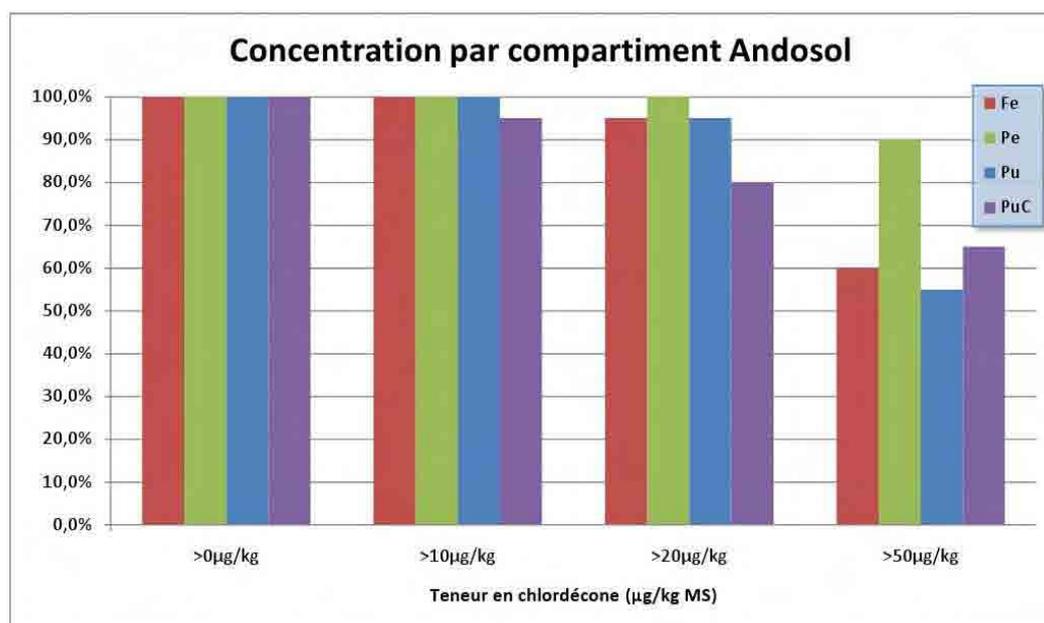


Figure 75 : Dachine - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Sur andosol, 100% des échantillons analysés sont positifs et contiennent de la chlordécone. Seul un échantillon de pulpe cuite a une concentration en chlordécone inférieure à 10 µg/kg de MF. Seuls un fruit entier, une pulpe et quatre pulpes cuite sont conformes, l'étude du taux de conformité par parcelles et par compartiment ne présente donc que peu d'intérêt et ne sera pas effectuée.

Environ 40% des fruits entiers et des pulpes présentent des teneurs en chlordécone inférieures à la LMP. Pour la peau, ce taux est réduit à 10%, ce qui est une fois de plus cohérent avec l'hypothèse d'un transfert privilégié de la chlordécone vers la peau par rapport à la pulpe.

L'étude de la répartition des teneurs obtenues dans le cadre de cet essai révèle une contamination particulièrement forte des différents compartiments végétaux du dachine y compris, au regard d'un autre légume-racine, la patate douce.

5.2 Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au tubercule entier et au sol

La concentration en chlordécone dans le tubercule entier, [Fe], sert de référence à la comparaison avec la concentration dans la peau, [Pe], dans la pulpe, [Pu], et dans la pulpe cuite, [PuC].

Les coefficients de détermination des courbes de tendance relatives aux expérimentations sur ferrisol-nitisol sont mauvais (de l'ordre de 0.1). Les coefficients de corrélation que ce soit pour les expérimentations sur ferrisol ou sur nitisol (cf. annexe 9) ne donnent pas de corrélation entre les teneurs des différents compartiments. Ces résultats sont probablement en lien avec la faible gamme de teneurs du sol dont nous disposons dans le cadre de ces essais. La variabilité intrinsèque au transfert combinée à la marge d'erreur des laboratoires de 30% sont ainsi mises en évidence. Néanmoins, les comportements généraux restent relativement similaires sur andosol et ferrisol-nitisol.

Dans ce paragraphe, nous limiterons donc notre étude aux résultats obtenus sur andosol.

5.2.1 Comparaison peau et pulpe

Concernant les résultats des dispositifs sur andosol, nous obtenons les résultats suivants :

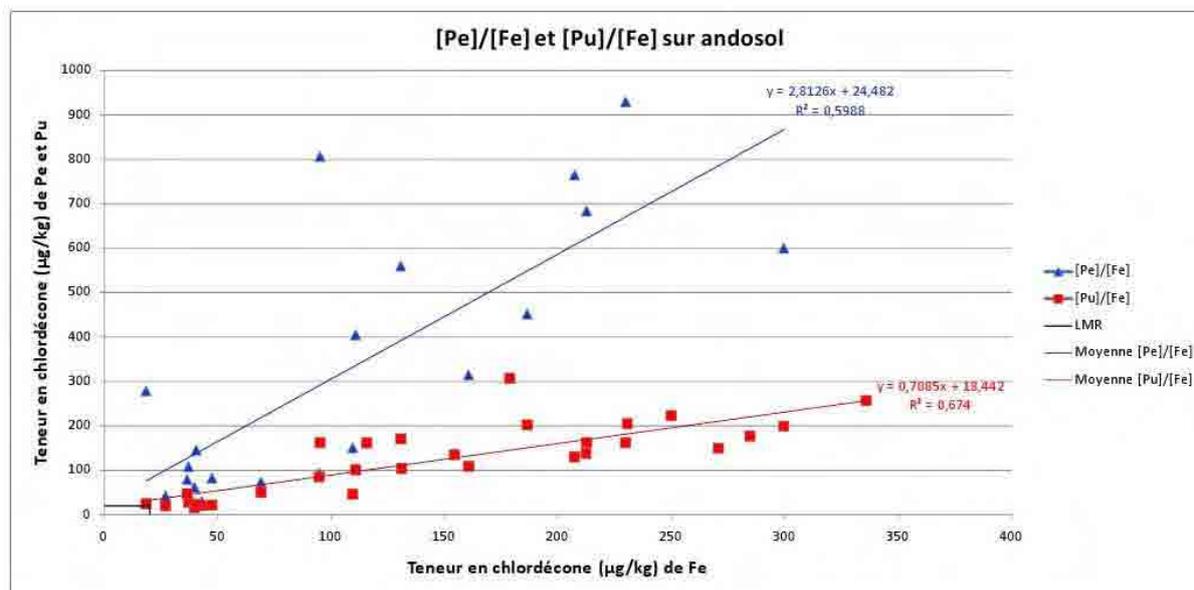


Figure 76 : Dachine - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol

Graphiquement, le taux de conformité très faible se voit clairement (Figure 77). Les courbes de tendance sont relativement représentatives, les coefficients de détermination étant bons ($r=0.6$ pour la relation peau/tubercule entier et $r=0.7$ pour celle pulpe/tubercule entier).

D'une manière générale, nous constatons que, sur andosol, la courbe de tendance concernant la relation concentration de la peau / concentration du tubercule entier (courbe bleue, Figure 76) est nettement au-dessus de celle relative à la pulpe et au tubercule entier (courbe rouge, Figure 76). Les comportements de la pulpe et de la peau diffèrent donc

clairement. **La peau est en moyenne trois à cinq fois plus contaminée que la pulpe pour la plage de données dont nous disposons.** Comme pour la patate douce, la différence de teneur en matière sèche entre la peau (28% de MS en moyenne, tous dispositifs confondus) et la pulpe (36% de MS en moyenne, tous dispositifs confondus) ainsi que la plus grande affinité de la chlordécone pour la matière sèche par rapport à celle pour l'eau ne peuvent expliquer cette différence. **Sur andosol, le transfert de chlordécone vers la peau est donc nettement privilégié par rapport à celui vers la pulpe.** Ceci pourrait être expliqué par un contact prolongé avec le sol pendant le cycle de culture.

Le coefficient de corrélation (cf. annexe 9), quant à lui, est très bon tant pour la relation peau/tubercule entier ($r=0.8$) que pour celle pulpe/tubercule entier ($r=0.9$). Sur andosol, il existe donc une forte proportionnalité entre les concentrations dans la peau et la pulpe et celle dans le tubercule entier.

5.2.2 Effet de la cuisson

Nous nous intéressons également à l'impact de la cuisson sur la teneur en chlordécone de la partie consommée, la pulpe. Nous allons donc comparer les résultats obtenus pour la pulpe crue (Pu) et la pulpe cuite (PuC). Comme précédemment, nous nous limitons aux données obtenues sur andosol.

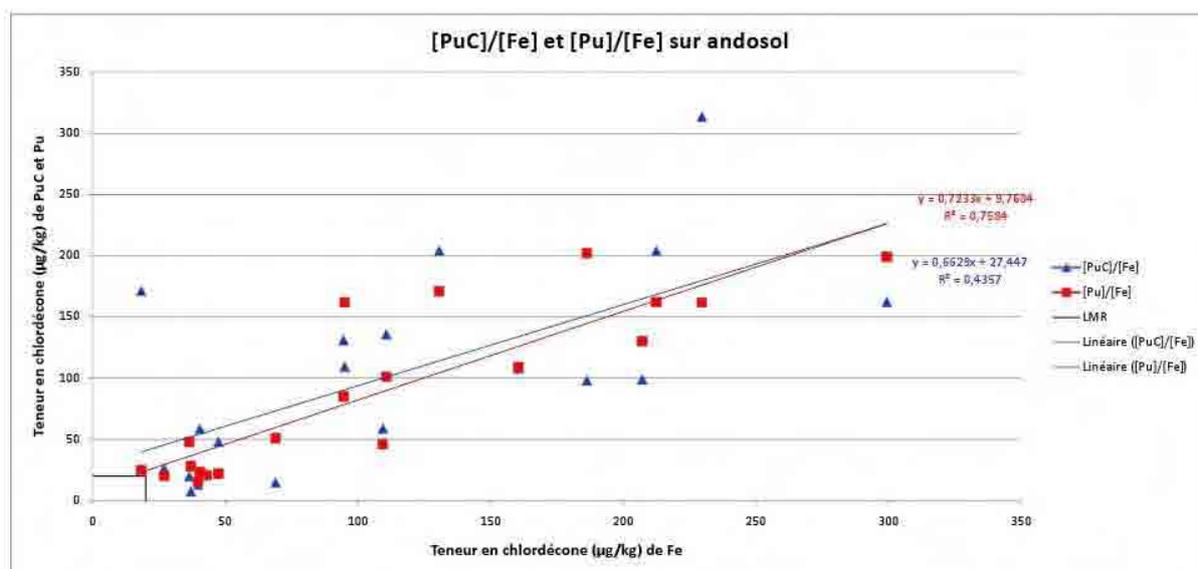


Figure 77 : Dachine - Concentration dans Pu et PuC par rapport à [Fe] sur andosol

Sur andosol, nous constatons que le comportement de la pulpe crue par rapport au transfert de chlordécone (courbe rouge Figure 77) est très proche de celui de la pulpe cuite (courbe bleue Figure 77). L'écart entre les deux courbes est en effet très faible surtout lorsque l'on prend en compte l'incertitude liée aux mesures.

Afin de comparer les teneurs moyennes en chlordécone dans la pulpe crue et dans la pulpe cuite, nous avons eu recours à un test de Friedman puis avons procédé à des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9), pour les mêmes raisons que précédemment (absence de normalité et d'indépendance).

Sur andosol comme sur ferrisol-nitisol, il n'existe pas de différence significative de teneurs en chlordécone entre la pulpe crue et la pulpe cuite : sur andosol, p-value = 0,462 et sur ferrisol-nitisol, p-value = 0.572.

Sur andosol, l'hétérogénéité des résultats est plus importante dans le cas de la pulpe cuite ($r^2=0.44$) que dans celui de la pulpe crue ($r^2=0.76$). De même, les coefficients de corrélation témoignent de la très forte proportionnalité entre les concentrations dans la pulpe crue et dans le tubercule entier ($r=0.9$), cette relation reste forte dans le cas de la pulpe cuite ($r=0.7$).

Nous pouvons donc considérer que, sur andosol, il n'existe pas d'importante différence de comportement entre la pulpe crue et la pulpe cuite par rapport au transfert de chlordécone. Les résultats statistiques de la comparaison des moyennes, nous permet d'aboutir à la même conclusion sur ferrisol-nitisol.

5.2.3 Conclusions

Le transfert de chlordécone du sol étant nettement plus important vers la peau que vers la pulpe du dachine, l'épluchage du tubercule permet de diminuer très nettement l'exposition du consommateur. La différence entre les concentrations moyennes en chlordécone dans le tubercule entier et dans la pulpe est de l'ordre d'un facteur 3 à 5. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans le cas de la patate douce.

Pour le dachine, les teneurs en chlordécone observées dans la pulpe et le tubercule entier sont très élevées. Néanmoins, tous les résultats obtenus concernent des échantillons de sol contaminés à au moins 0.7 mg/kg de SS sur andosol et 1 mg/kg de SS sur ferrisol-nitisol ; ce qui demeure des valeurs élevées par rapport à la valeur seuil de 0.1 mg/kg de SS préconisée pour la mise en culture. Il serait donc intéressant d'obtenir des données complémentaires sur des parcelles moins fortement contaminées par la chlordécone (teneur inférieure à 1 mg/kg de SS). D'autre part, le transfert maximum sur ferrisol-nitisol pourrait avoir été surestimé en raison de la faible gamme de teneur de sol disponible. Les résultats obtenus pour le dachine sur andosol sont, quoi qu'il en soit, nettement supérieurs à ceux obtenus pour les autres cultures.

L'impact quasi négligeable de la cuisson sur la teneur en chlordécone de la pulpe est confirmé par l'étude des résultats observés pour les pulpes crues et cuites.

5.3 Transferts sol-plante

Nous allons maintenant nous intéresser à la relation entre concentration dans le végétal et teneur du sol en chlordécone. Concernant les pulpes, nous nous limitons à l'étude de la pulpe crue, le comportement de la pulpe cuite étant relativement similaire.

Les courbes de transferts maxima obtenues passent toutes à proximité du point (0 ; 0), le choix a donc été fait de « forcer » le passage des courbes par ce point. La comparaison des pentes des courbes et donc des transferts est ainsi plus aisée.

5.3.1 Comparaison andosol et nitisol-ferrisol

Nous commençons par étudier le transfert de chlordécone du sol vers le tubercule entier.

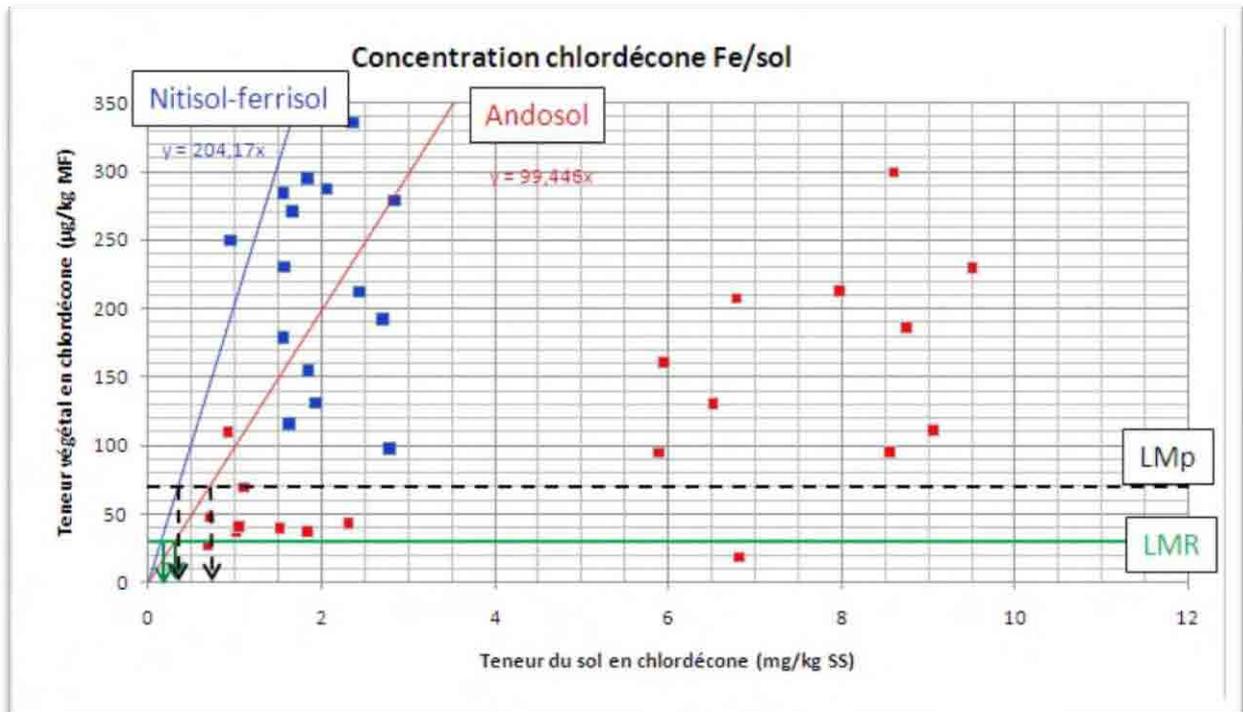


Figure 78 : Dachine - [Fe]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Pour plus de lisibilité, seuls les transferts maxima sont représentés sur le graphique (Figure 78).

Le coefficient de corrélation est bon pour la relation tubercule entier/sol sur andosol ($r^2=0.7$) et confirme l'existence d'une relation linéaire forte sur ce type de sol (cf. Annexe 9). Nous rappelons que le test de corrélation sur ferrisol-nitisol a conduit à rejeter l'hypothèse d'une relation linéaire entre teneur dans les compartiments et teneur dans le sol.

Les transferts maxima sont nettement différents sur andosol (courbe rouge, Figure 78) et ferrisol-nitisol (courbe bleue, Figure 78). La courbe relative aux données obtenues sur ferrisol-nitisol est bien au-dessus de celle concernant l'andosol, confirmant un transfert plus important sur ce type de sol. La pente des courbes est très élevée par rapport aux cultures précédemment étudiées, reflet d'un transfert plus important de chlordécone du sol vers le tubercule. Sur ferrisol-nitisol ($y=204x$) le transfert maximum a une pente environ deux fois plus importante que sur andosol ($y=99x$). **Ces valeurs correspondent à des taux de transfert de chlordécone du sol vers le tubercule entier de l'ordre de 10% sur andosol et 20% sur ferrisol-nitisol.**

La concentration maximale du sol en deçà de laquelle, le tubercule entier sera conforme est de 0.2 mg/kg sur andosol et 0.1 mg/kg sur ferrisol-nitisol, ce qui est assez proche et constitue une limite relativement basse (niveau de pollution du sol faible). Concernant la LMp, les teneurs maximales du sol sont de 0.5 mg/kg sur andosol et 0.25 mg/kg sur ferrisol-nitisol.

Nous nous intéressons maintenant au comportement de la peau en fonction de la teneur du sol en chlordécone.

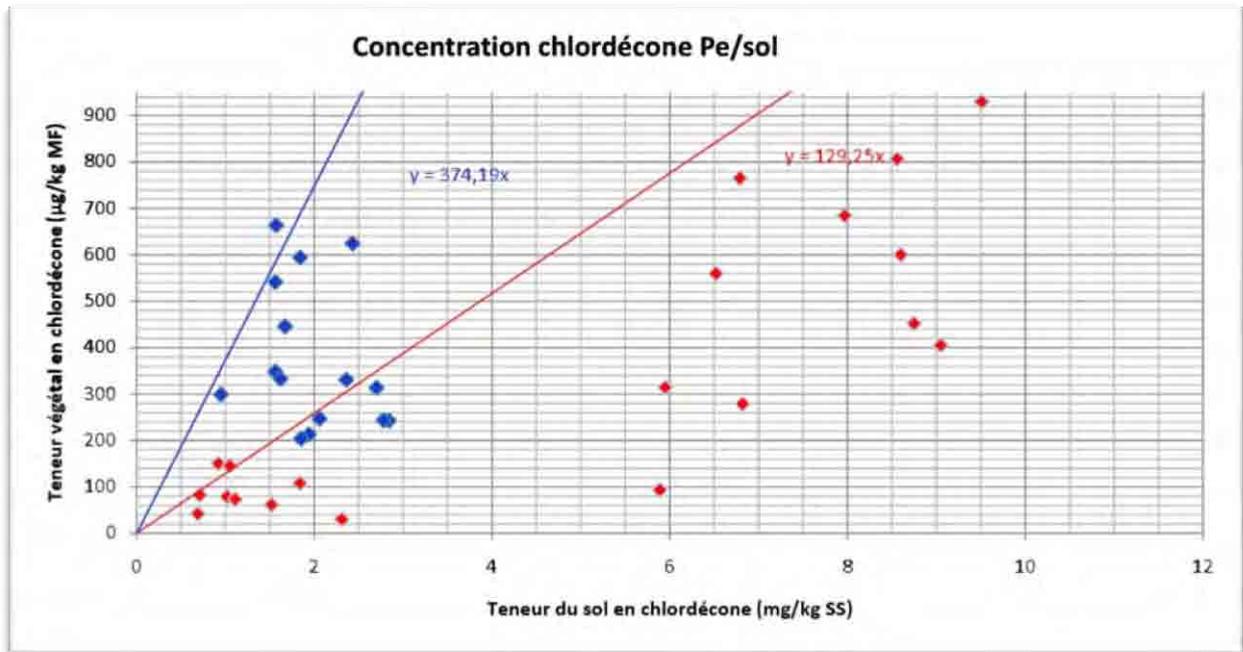


Figure 79 : Dachine - [Pe]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Etant donné l'échelle du graphique, la LMR et la LMP ne sont pas représentées. Les concentrations maximales de sol sont obtenues non par lecture graphique mais par calcul ($y=20$ ou $y=50$).

Sur andosol, d'après les tests de corrélation (cf. Annexe 9), le coefficient de détermination de la courbe de tendance révèle une forte homogénéité avec $r^2=0.7$ (cf. Annexe 9). Le coefficient de corrélation ($r=0.8$) confirme une relation linéaire forte entre concentrations dans le sol et dans la peau (cf. Annexe 9).

Tous les points ont été conservés pour le tracé du transfert maximum. Il est à noter que, sur ferrisol-nitisol, la faible gamme de valeurs de concentration du sol en chlordécone associée à la marge d'erreur du laboratoire de l'ordre de 30% ne permettent pas d'éliminer d'éventuels points aberrants.

Rappelons que, sur ferrisol-nitisol, la valeur du coefficient de corrélation a conduit à accepter l'hypothèse que, d'un point de vue statistique, il n'existait pas de lien entre les concentrations en chlordécone des différents compartiments végétaux, ni même avec la teneur du sol (cf. annexe 9).

Sur ferrisol-nitisol ($y=374x$), le transfert de chlordécone du sol vers la peau est de 37% soit presque quatre fois plus important que sur andosol où il est de 13% ($y=129x$).

Le risque de dépassement de LMR par la peau apparaît pour des concentrations du sol en chlordécone de 0.15 mg/kg sur andosol et 0.05 mg/kg sur ferrisol, ce qui est très faible. La LMP peut elle être atteinte pour des teneurs du sol de 0.38 mg/kg sur andosol et 0.14 mg/kg sur ferrisol, teneurs toujours faibles.

Pour finir, nous étudions les transferts de chlordécone du sol vers la pulpe qui est le compartiment consommé.

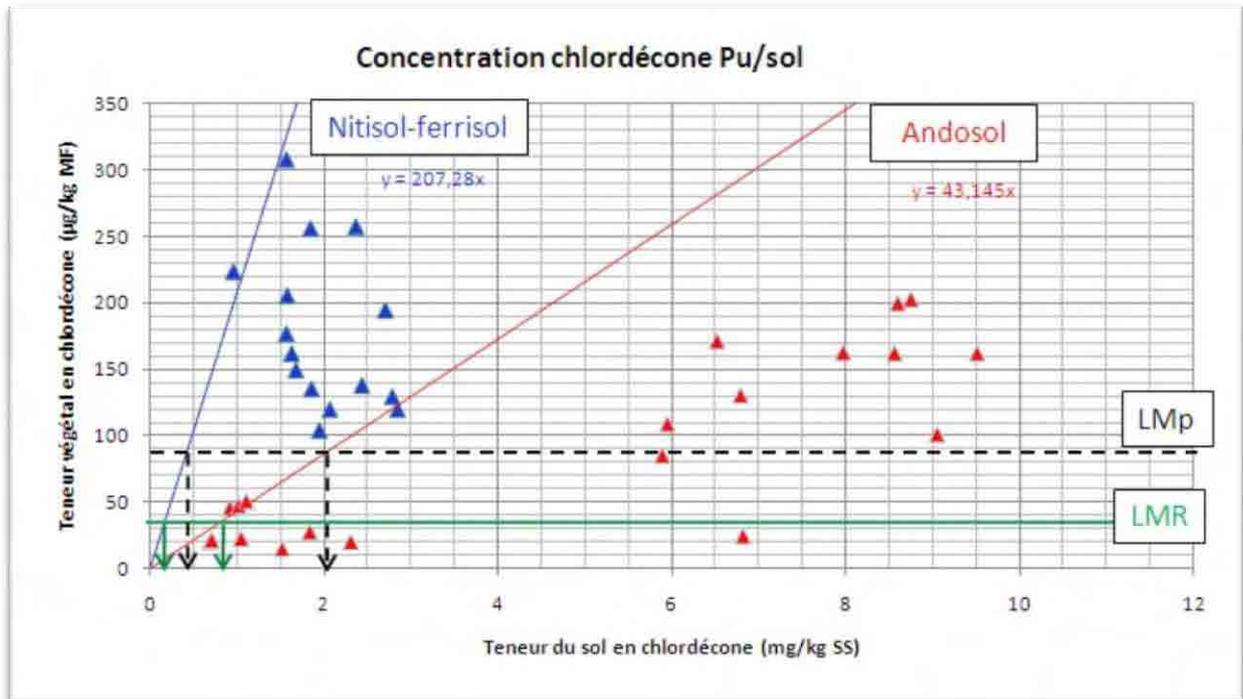


Figure 80 : Dachine - [Pu]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Sur andosol, le coefficient de détermination ($r^2=0.7$, cf. Tests de corrélation en Annexe 9) confirme la bonne homogénéité observée graphiquement. La valeur du coefficient de corrélation révèle quant à elle une relation linéaire très forte entre les deux variables. Nous constatons visuellement la forte hétérogénéité des résultats sur ferrisol-nitisol. Ceci est confirmé par le fait que la relation linéaire entre les concentrations en chlordécone dans la pulpe et dans le sol n'est pas vérifiée sur ferrisol-nitisol ni même sur l'un ou l'autre des sols étudiés séparément. L'absence de corrélation linéaire sur ferrisol-nitisol est due au faible intervalle de valeurs des teneurs de sol en chlordécone sur cette parcelle (1 à 2.8 mg/kg de SS) et à l'hétérogénéité de la réponse de la plante, associés à l'incertitude des résultats d'analyse des laboratoires. Ceci aboutit à obtenir graphiquement un positionnement en « colonne » des points.

Sur andosol, l'homogénéité est importante ($r^2=0.5$, cf. Annexe 9) et la relation linéaire entre les concentrations du sol et de la pulpe est forte ($r=0.7$).

Comme pour le tubercule entier et la peau, la courbe de transfert maximum pour l'andosol (courbe rouge, Figure 80) est très nettement en dessous de celle pour le ferrisol (courbe bleue, Figure 80). Le transfert sol/pulpe sur ferrisol-nitisol est de l'ordre de 20% ($y=207x$) tandis que, sur andosol, il est de l'ordre de 4.5% ($y=43x$). Comme pour le tubercule entier, le transfert sol-pulpe est donc très nettement supérieur sur ferrisol-nitisol que sur andosol, dans ce cas-ci, cinq fois plus important.

Le risque de « non-conformité » de la pulpe apparaît pour des sols contaminés à 0.45 mg/kg de SS sur andosol et 0.1 mg/kg de SS sur ferrisol-nitisol. Le risque de dépassement de la LMp apparaît pour des teneurs du sol en chlordécone de 1.1 mg/kg de SS sur andosol et 0.25 mg/kg de SS sur ferrisol-nitisol.

5.3.2 Comparaison entre compartiments

Nous nous intéressons maintenant à la comparaison des courbes de transfert maximum obtenues sur andosol pour les trois compartiments (Figure 81).

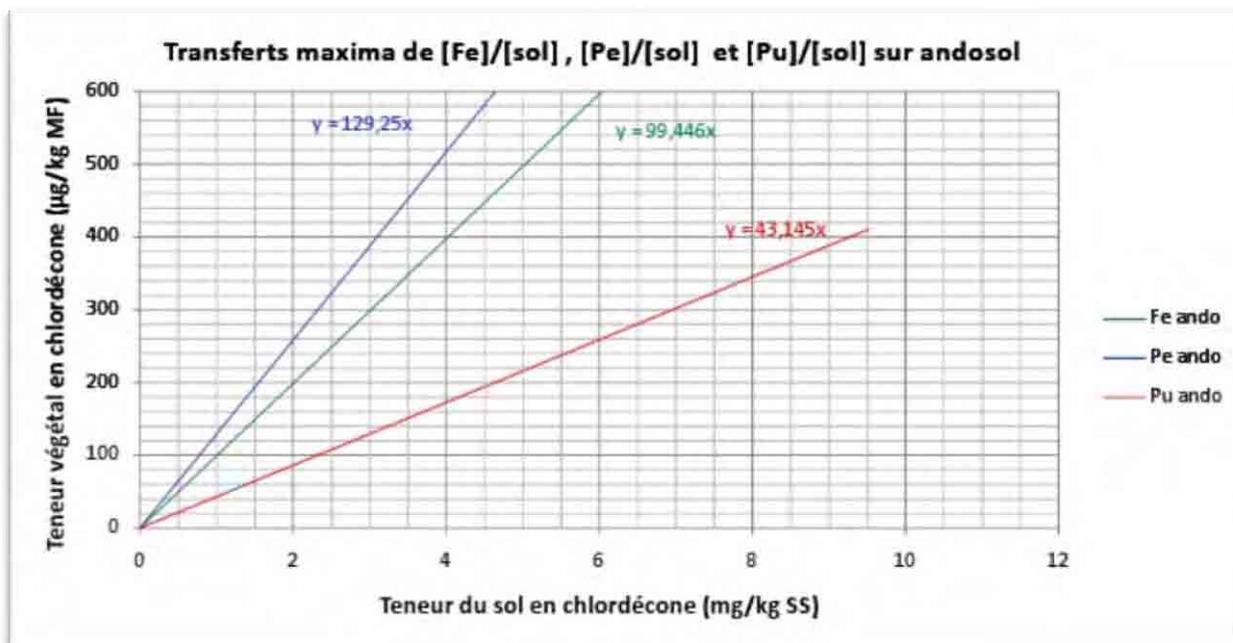


Figure 81 : Dachine– Transferts maxima des différents compartiments sur andosol

Comme pour la patate douce, le transfert maximum sol-peau (courbe bleue, Figure 81) est nettement au dessus de celle du transfert maximum sol-pulpe (courbe rouge, Figure 81), la courbe du transfert sol-tubercule entier (courbe verte, Figure 81) est, quant à elle, logiquement entre les deux.

Nous constatons qu'il existe un coefficient multiplicateur proche de trois entre les transferts maxima sol-pulpe et sol-peau. Par contre, le transfert maximum observé du sol vers le tubercule entier est relativement proche de celui vers la peau. En effet, les transferts maxima sont de l'ordre de 4.5% pour la pulpe, 10% pour le tubercule entier et 13% pour la peau.

L'hypothèse selon laquelle, dans le cas du dachine, le transfert de chlordécone du sol vers la plante se fait de manière nettement privilégiée en faveur de la peau et donc confirmée.

Sur ferrisol-nitisol (Figure 82), des résultats similaires peuvent être observés avec des taux de transferts plus élevés.

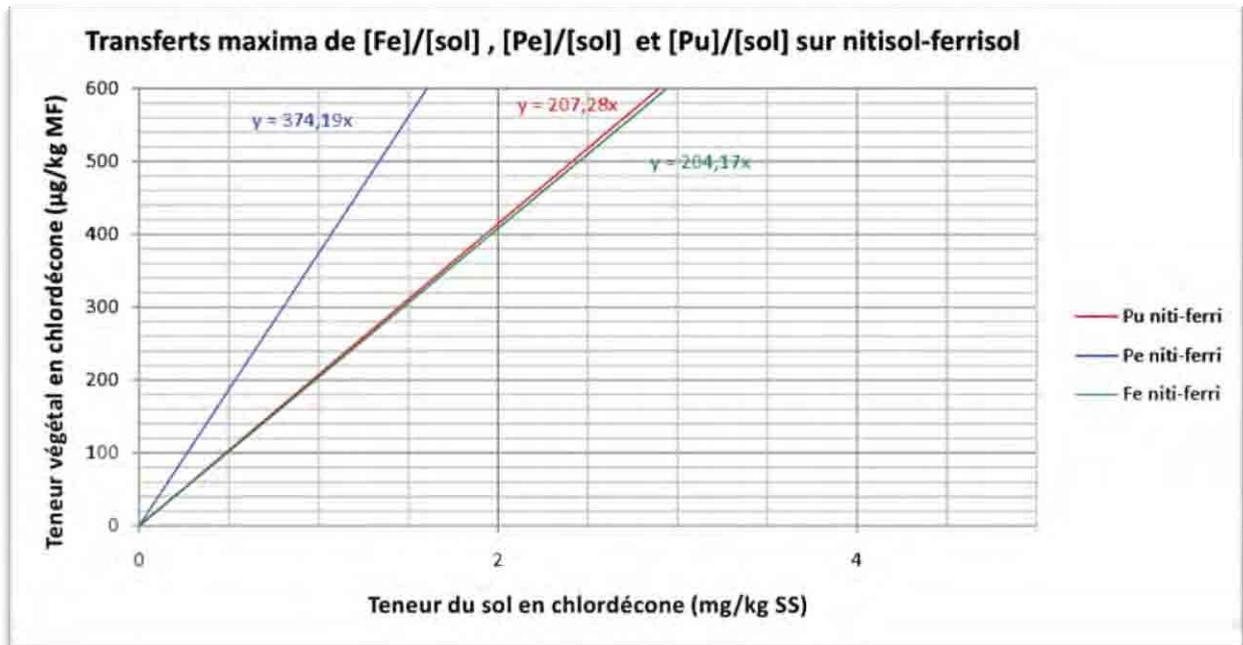


Figure 82 : Dachine – Transferts maxima des différents compartiments sur ferrisol-nitisol

Sur ferrisol-nitisol, les taux de transferts maxima sont supérieurs à ceux observés sur andosol néanmoins, **l'existence d'un transfert privilégié vers la peau par rapport à la pulpe est confirmée.**

Les transferts maxima obtenus dans le cadre de cette étude sur sols fortement contaminés par la chlordécone sont :

- 20% du sol vers la pulpe,
- 20% du sol vers le tubercule entier,
- 40% du sol vers la peau.

Les résultats obtenus sur ferrisol-nitisol sont au niveau du transfert de 20% généralement appliqué mais la faible gamme de teneurs de sol étudiée pour ce type de sol a pu conduire à une surestimation du taux de transfert maximum car il n'était pas possible d'identifier les éventuels points aberrants en raison de l'aspect en colonne du nuage de points. Afin de confirmer ces valeurs très élevées, il serait nécessaire de compléter la gamme d'observation. Néanmoins, ces biais n'ont pu conduire qu'à une surestimation du risque et demeurent donc très sécuritaires.

5.3.3 Conclusions

L'étude des données obtenues sur dachine permet de conclure que le comportement des différents compartiments du tubercule vis-à-vis du transfert de chlordécone diffère sur andosol et ferrisol. Même si les tendances restent les mêmes, les valeurs limites, elles, sont différentes. **Le transfert sol-plante est plus important sur ferrisol-nitisol que sur andosol.**

Sur andosol, nous observons un **transfert maximum de chlordécone du sol vers la plante, de l'ordre de 4.5% pour la pulpe, il est de 10% pour le tubercule (fruit entier) et 13% pour la peau.** Ces taux sont deux à trois fois supérieurs à ceux obtenus sur patate douce. **Sur ferrisol-nitisol, les transferts de chlordécone sont de 20% du sol vers la pulpe, et vers le tubercule et de 40% du sol vers la peau, ce qui est deux à cinq fois supérieur aux transferts observés sur andosol.**

Pour le dachine, les transferts du sol vers la plante sont donc très nettement supérieurs à ceux observés sur les cultures précédemment étudiées. L'importance du transfert s'explique

tout d'abord par le développement souterrain de l'organe, en contact direct avec la chlordécone présente dans le sol.

Sur ferrisol-nitisol, ces résultats sont égaux à la valeur de référence de 20% généralement admise pour le transfert maximum sol-plante des racines et tubercules. Cette valeur étant appliquée à toutes les cultures de légumes-racines.

Enfin, l'existence d'une contamination privilégiée de la peau par rapport à la pulpe est à souligner. En effet, le rapport entre le transfert maximum vers la pulpe est trois fois moins important que celui vers la peau sur andosol et deux fois moins important sur ferrisol-nitisol.

Ces rapports sont similaires à ceux obtenus sur patate douce, l'épaisseur de la peau ne semble pas influencer sur la répartition peau/pulpe de la chlordécone au sein du tubercule. Cette hypothèse sera à mettre en regard des résultats obtenus pour l'igname.

Nous observons un transfert du sol vers l'organe récolté nettement supérieur à celui obtenu sur patate douce. Cette différence de comportement pourrait venir de la nature de l'organe, des caractéristiques du processus de remplissage ou de la structure de la « peau », voire d'une combinaison de ces différents facteurs.

En effet, la partie consommée du dachine n'est pas une racine, comme c'est le cas pour l'igname et la patate douce mais une tige souterraine : un corne. Ce type d'organe est une tige recouverte de minces feuilles desséchées, il est constitué d'un cylindre central et d'un cortex extérieur. Les flux d'eaux s'effectuent essentiellement dans la partie centrale du corne qui est très bien vascularisée (Ping L. et al., 2002). Le transport d'eau étant très actif dans la partie centrale du corne, on peut formuler l'hypothèse que le dachine aurait une aptitude particulière à transférer les éléments présents dans le sol, y compris la chlordécone, dès lors qu'ils pénètrent via les flux d'eau. Par ailleurs, le fonctionnement de la structure extérieure du corne, constituée d'écailles foliaires très serrées, a peu été étudiée. Cette structure particulière pourrait expliquer un piégeage des particules de sol plus important.

5.4 Préconisations envisagées

La contamination étant nettement plus importante pour la peau que la pulpe, **l'épluchage permet de diminuer significativement l'exposition du consommateur.**

Par ailleurs, au vu des taux de transfert maximum de chlordécone du sol vers les différents compartiments du tubercule, il convient de préconiser **d'éviter la culture de dachine sur les sols contaminés au-delà de 0.1 mg/kg** quel que soit le type de sol afin de limiter le risque de dépassement de la LMR des produits commercialisés et consommés.

6 Résultats pour l'igname

Dans le cadre de cette étude, nous disposons de 40 résultats de recherche de chlordécone pour chacun des quatre compartiments : Tubercule entier (noté Fe, Fruit entier, par cohérence avec le concombre et le giraumon), Peau (Pe), Pulpe (Pu) et Pulpe Cuite (PuC).

Pour l'igname, il nous a été possible de récolter suffisamment de plants sur quatre parcelles mises en culture pour d'obtenir des effectifs d'échantillons représentatifs. Nous disposons de 10 répétitions sur chaque parcelle récoltée (Ferri, Niti, Ando2 et Ando 3).

6.1 Ventilations des teneurs et taux de conformité

6.1.1 Ventilation des teneurs en chlordécone mesurées

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à la ventilation des teneurs des sols en chlordécone (Tableau 35). Nous disposons de données pour deux parcelles sur andosol, une sur nitisol et une sur ferrisol.

Valeurs					
Etiquettes de lignes	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype
Ando3	20	5,6	0,8	20,3	5,1
Ando2	10	9,8	6,5	20,3	4,0
Ferrisol+Nitisol	20	2,2	1,7	3,8	0,5
Niti	10	2,5	1,7	3,8	0,8
Ferri	10	2,0	1,8	2,5	0,3
Total général	40	3,9	0,8	20,3	4,0

Tableau 35 : Igname - Concentrations en chlordécone des échantillons de sol par type de sol (mg/kg SS)

Nous constatons que les teneurs moyennes observées sur les différentes parcelles d'andosol sont très distinctes. En effet, la moyenne sur le dispositif Ando3 est de 1.5 mg/kg de SS, tandis que, sur Ando2, elle est de 9.8 mg/kg de SS, ce qui est très élevé. Les valeurs des minima et maxima de ces dispositifs confirment cette tendance. L'écart-type est moyen sur Ando2 (de l'ordre de 40% par rapport à la moyenne) et assez fort sur Ando3 (de l'ordre de 70% par rapport à la moyenne).

En revanche, concernant les dispositifs sur ferrisol et nitisol, les teneurs moyennes du sol en chlordécone sont proches : 2 mg/kg SS sur ferrisol et 2.5 mg/kg SS sur nitisol. Nous obtenons un intervalle de valeurs allant de 1.7 mg/kg SS à 3.8 mg/kg SS sur nitisol qui englobe l'intervalle de valeurs de la parcelle de ferrisol s'échelonnant de 1.8 mg/kg SS à 2.5 mg/kg SS. La parcelle de ferrisol s'avère bien homogène (écart-type de l'ordre de 15% de la moyenne) tandis que celle de nitisol est moins homogène (écart-type de l'ordre de 30%).

Globalement, autant sur andosol l'intervalle des valeurs de sol observées s'étend sur une large gamme de teneurs de sol, autant sur ferrisol-nitisol, cette gamme est restreinte. En particulier sur ferrisol, la gamme des teneurs du sol en chlordécone a une amplitude de seulement 0.7 mg/kg de SS et un écart-type de 0.3 mg/kg de SS. Ceci pourrait faire apparaître une forte hétérogénéité dans les relations entre les différents compartiments et le sol en mettant en exergue la variabilité de la réponse de la plante ainsi que la marge d'erreur du laboratoire mais également à la réponse de la plante.

Concernant les analyses de résidus sur végétaux, nous nous intéressons dans un premier temps aux données ventilées par dispositif expérimental (4 parcelles).

Valeurs					
	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype
Andosol	80	67,6	1	530	119,6
Ando3	40	14,0	1	115,9	23,4
Ando2	40	121,1	3,5	530	150,5
FerriSol+NitriSol	80	78,9	1	439	100,9
Niti	40	106,3	8	439	119,0
Ferri	40	51,6	1	279	70,3
Total general	160	73,3	1	530	110,6

Tableau 36: Ignose - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par parcelle ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

Les échantillons prélevés sur la parcelle Ando3 apparaissent comme les moins fortement contaminés avec une teneur moyenne en chlordécone de $14 \mu\text{g}/\text{kg}$ de matière fraîche, ce qui est inférieur à la LMR. Ceux de Ando2 sont plus contaminés avec une moyenne de $121 \mu\text{g}/\text{kg}$, ce qui est largement au-delà de la LMR et de la LMp mais cohérent avec le très fort niveau de contamination de cette parcelle ($9.8 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS, en moyenne). La teneur minimale obtenue sur ce dispositif est de $3.5 \mu\text{g}/\text{kg}$, certains échantillons prélevés sont donc conformes mais leur nombre est probablement peu élevé étant donnée la valeur de la concentration moyenne.

Les valeurs moyennes, minimales et maximales observées sont en faveur de l'hypothèse d'une sensibilité de l'igname au transfert de chlordécone du sol vers la plante plus proche de celle de la patate douce que du dachine.

Sur nitisol, la concentration moyenne obtenue est de $106.3 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF, ce qui est nettement au-dessus de la LMp.

Concernant le ferrisol, la teneur moyenne des échantillons en chlordécone est de $51.6 \mu\text{g}/\text{kg}$. Les concentrations moyennes des échantillons végétaux sur les dispositifs Ando2 et Niti sont du même ordre de grandeur alors que la teneur moyenne du sol est de presque $10 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS sur Ando3 et seulement $2.5 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS sur Niti soit quatre fois moins. Ceci est nettement en faveur de l'hypothèse de **transferts sol-plantes plus importants sur ferrisol que sur andosol.**

Quels que soient le type de sol et le dispositif, les écarts-types sont de l'ordre de 100% à 200% (Ando3) par rapport à la moyenne ce qui est supérieur à l'hétérogénéité observée entre les teneurs de sol en chlordécone, ceci révèle l'hétérogénéité du transfert sol-plante. Celle-ci est probablement liée à l'hétérogénéité de la répartition à très petite échelle de la chlordécone dans le sol de la parcelle.

Nous étudions maintenant les données ventilées par grand type de sol et compartiment végétal.

	Valeurs				
	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecartype
Andosol	80	67,6	1	530	119,8
Fe	20	66,2	2,4	222,2	71,6
Pe	20	186,5	5,9	530	179,5
Pu	20	8,1	1	38,9	9,7
PuC	20	9,4	1	34,5	9,9
Ferrisol+Nitisol	80	78,9	1	439	100,9
Fe	20	87,4	16,5	439	92,8
Pe	20	199,5	67,7	394	96,2
Pu	20	13,8	1	41	12,1
PuC	20	15,0	1,2	48	13,8
Total général	160	73,3	1	530	110,6

Tableau 37 : Igname - Concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par type de sol et par compartiment végétal ($\mu\text{g}/\text{kg}$ MF)

La répartition des effectifs entre les différentes parcelles et les deux grands types de sol est équilibrée : 80 résultats obtenus sur andosol et 80 sur ferrisol-nitisol soit 10 répétitions pour chacune des quatre parcelles et quatre compartiments étudiés.

La moyenne des teneurs des compartiments végétaux en chlordécone sur andosol ($67,6 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) et sur ferrisol-nitisol ($78,9 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) sont comparables. Les concentrations moyennes obtenues pour les sols ($5,6 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS pour les andosols et $2,2 \text{ mg}/\text{kg}$ de SS pour les ferrisol-nitisols) sont en faveur de l'hypothèse d'un transfert sol-plante plus important sur ferrisol et nitisol que sur andosol.

Il est à noter que les teneurs moyennes des pulpes crues et cuites sont inférieures à $15 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF donc en dessous de la LMR. Ces valeurs sont bien inférieures à celles observées dans le fruit entier, de $66,2 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF sur andosol et de $87,4 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF sur ferrisol-nitisol. Concentrations supérieures à la LMR et à la LMP.

La peau, quant à elle, présente des teneurs nettement plus élevées que les autres compartiments avec des valeurs moyennes de l'ordre de $200 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF et des maxima très élevés (530 et $394 \mu\text{g}/\text{kg}$ de MF) sur andosol et ferrisol-nitisol.

Comme pour les autres racines et tubercules, les résultats par compartiment ne suivent pas une distribution de loi normale (cf. annexe 9) et sont appariés. Nous avons donc eu recours à un test de Friedman puis avons procédé à des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9).

L'étude des moyennes révèle, sur andosol, qu'il existe une différence statistique de teneurs en chlordécone entre la peau, le fruit entier et les pulpes (qui elles appartiennent au même groupe).

Sur ferrisol-nitisol, nous constatons que les concentrations de la peau, du fruit entier et des pulpes sont statistiquement différentes. Concernant la comparaison des moyennes des teneurs dans la peau et les pulpes (crue comme cuite), la p-value est $<0,0001$

Pour les deux types de sol, la peau apparaît donc nettement plus polluée que les autres compartiments. **Il semble donc que, pour l'igname comme pour le giraumon et les autres racines et tubercules étudiés, le transfert de chlordécone vers la peau soit privilégié par rapport à celui vers la pulpe.**

Par ailleurs, les écart-types sont de l'ordre de 100%, quels que soient le compartiment et le type de sol. Seule la peau sur ferrisol-nitisol présente un écart-type nettement supérieur, de l'ordre de 200%.

Nous nous intéressons maintenant à la ventilation des concentrations en chlordécone dans les différents compartiments végétaux. Les tableaux 38 à 40 et les représentations graphiques correspondantes (Figure 83 à 85) présentent la répartition des concentrations en chlordécone du tubercule entier (Fe), de la peau (Pe), de la pulpe (Pu) et de la pulpe cuite (PuC).

Nous nous intéressons tout d'abord à la répartition des teneurs en chlordécone observées dans les différents compartiments, tous types de sols confondus.

Classes	Tout			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	40	40	40	40
0µg/kg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	85,0%	97,5%	35,0%	42,5%
>20µg/kg	75,0%	92,5%	20,0%	22,5%
>50µg/kg	55,0%	80,0%	0,0%	0,0%

Tableau 38 : Igname - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

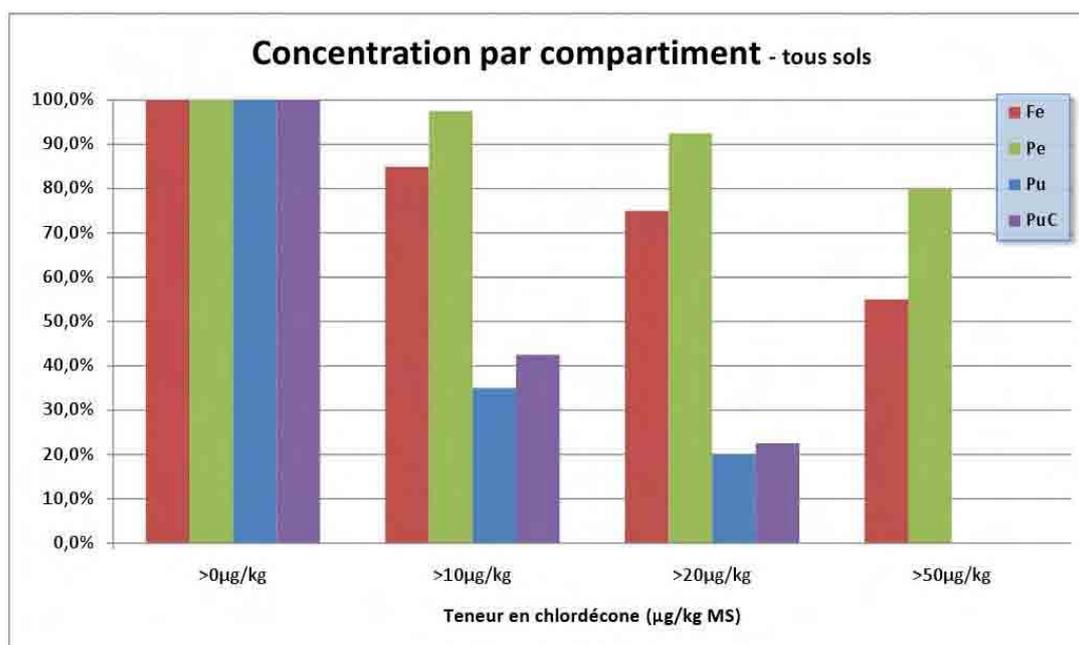


Figure 83 : Igname - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment (µg/kg MF)

Nous constatons que tous les échantillons prélevés présentent au moins des traces de résidus de chlordécone, quel que soit le compartiment étudié.

Environ 80% des pulpes crues et cuites sont conformes tandis que 75% des fruits entiers et 92% des peaux ont des teneurs en chlordécone supérieures à la LMR et sont donc non-conformes.

Enfin, il est à noter qu'aucune pulpe crue ou cuite n'est contaminée en chlordécone au-delà de l'ancienne limite provisoire. Tandis que plus de 50% des fruits entiers et 80% des peaux sont contaminées au-delà de 50 µg/kg de MF.

La tendance de la peau à être plus contaminée que la pulpe semble donc être confirmée par la répartition des effectifs observée dans les différentes classes.

Concernant l'andosol, nous obtenons les résultats suivants :

Classes	andosol			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	20	20	20	20
0µg/kg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	70,0%	95,0%	20,0%	35,0%
>20µg/kg	60,0%	85,0%	10,0%	15,0%
>50µg/kg	45,0%	60,0%	0,0%	0,0%

Tableau 39 : Igname - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

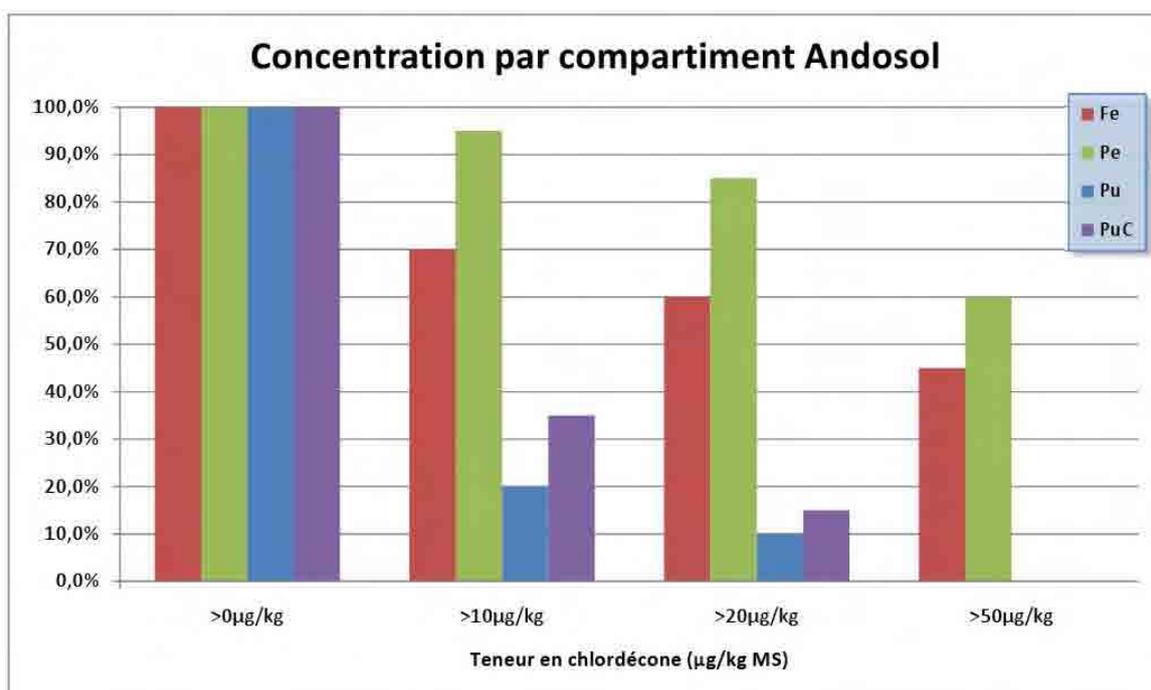


Figure 84 : Igname - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur andosol (µg/kg MF)

Sur andosol, 100% des échantillons analysés sont positifs à la recherche de chlordécone. Comme pour tous sols confondus, la peau et les pulpes présentent un comportement bien distinct. Nous observons 85% de non-conformité pour la peau tandis que seuls 10% des pulpes et 15% des pulpes cuites présentes des valeurs supérieures à la LMR.

Nous constatons également qu'aucune pulpe (crue comme cuite) n'est contaminée au-delà de la LMP et ce malgré une teneur moyenne des andosols en chlordécone de 5.6 mg/kg SS, ce qui est très élevé. Il est à noter que 45% des tubercules entiers atteignent des concentrations en chlordécone supérieures à la LMP.

Ces constatations sont en faveur d'un transfert privilégié vers la peau par rapport à la pulpe. L'analyse détaillée des résultats obtenus devrait permettre de confirmer cette hypothèse.

Les résultats sont globalement similaires à ceux obtenus tous sols confondus avec une tendance à un pourcentage de non-conformité plus faible.

Les résultats obtenus sur ferrisol-nitisol sont répartis comme suit :

Classes	nitisol et ferrisol			
	Fe	Pe	Pu	PuC
Nb échantillons	20	20	20	20
0µg/kg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>0µg/kg	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
>10µg/kg	100,0%	100,0%	50,0%	50,0%
>20µg/kg	90,0%	100,0%	30,0%	30,0%
>50µg/kg	65,0%	100,0%	0,0%	0,0%

Tableau 40 : Igname - Répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur nitisol et ferrisol (µg/kg MF)

Ces données correspondent au graphe suivant :

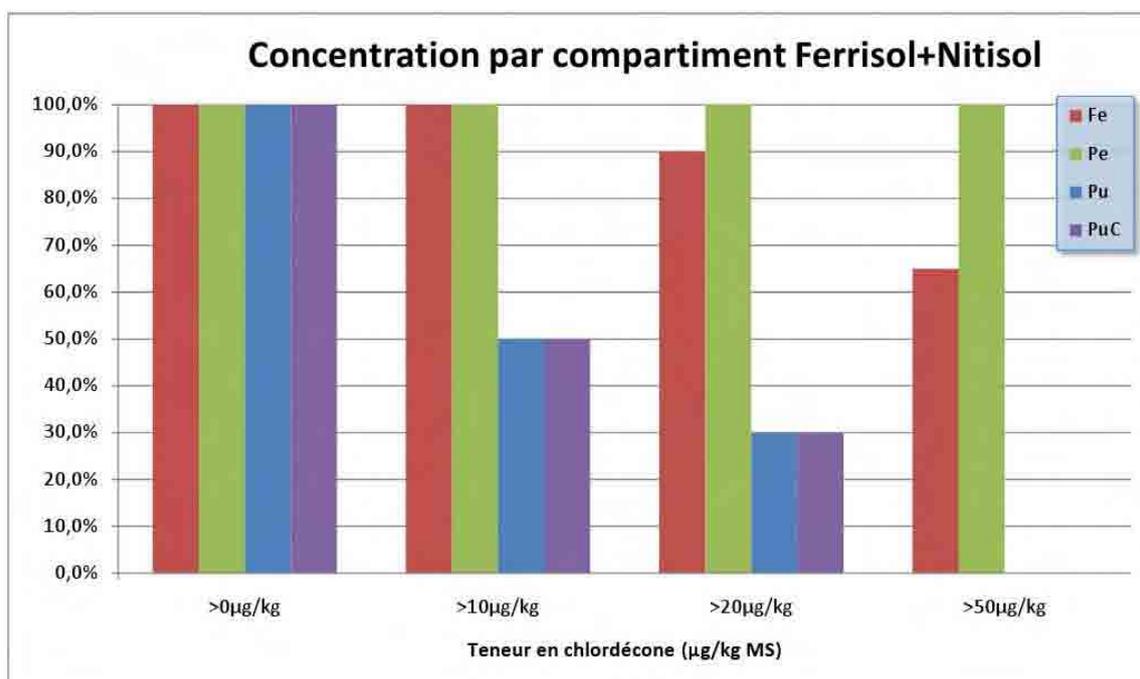


Figure 85 : Igname - Graphique des répartitions des concentrations en chlordécone des échantillons végétaux par compartiment sur nitisol et ferrisol (µg/kg MF)

Les grandes tendances observées sur ferrisol-nitisol sont les mêmes que sur andosol. Les taux de non-conformité sont néanmoins plus élevés, que ce soit pour la pulpe crue comme cuite, avec 30% d'échantillons dont la concentration en chlordécone est supérieure à 20 µg/kg de MF, ou pour les tubercules entiers qui sont presque tous non-conformes (90%). Rappelons que sur andosol ces valeurs étaient de 10% pour la pulpe crue, 15% pour la pulpe cuite et 60% pour le tubercule entier.

Concernant la LMp à 50 µg/kg de MF, les résultats sur andosol et ferrisol-nitisol sont identiques concernant les pulpes crues et cuites (aucun de dépassement). Les tubercules entiers, quant à eux, sont plus souvent en dépassement de la LMp sur ferrisol-nitisol que sur andosol avec 65% de fréquence de dépassement pour le tubercule entier.

Les peaux présentent toutes des concentrations en chlordécone supérieures à la LMp.

6.1.2 Taux de conformité

Pour l'étude des taux de conformité obtenus, c'est-à-dire du pourcentage d'échantillons dont la concentration est inférieure ou égale à la LMR de 20 µg/kg, nous étudions tout d'abord les taux de conformité en fonction du type de sol.

Pour les ferrisols et les nitisols, tous les résultats concernent une seule parcelle, en revanche, pour les andosols, nous disposons de résultats issus de deux parcelles.

Nombre de <=20µg			Conformité
ando	Code exploit	Total	%
Andosol	Ando3	31	77,5%
	Ando2	15	37,5%
Ferrisol+Nitisol	Niti	9	22,5%
	Ferri	21	52,5%
Total général		76	47,5%

Tableau 41 : Igname - Taux de conformité par type de sol

Nous constatons que le **taux de conformité** est assez faible sur Ando2 (37.5%) et Niti (22.5%). En revanche, il est moyen sur Ferri (52.5%), parcelle dont la teneur moyenne du sol en chlordécone de 2 mg/kg de SS, et relativement **bon sur Ando3 (77.5%), parcelle dont la teneur moyenne du sol en chlordécone de 1.5 mg/kg de SS.**

La parcelle Ando3, dont la teneur moyenne du sol en chlordécone est d'environ 1.5 mg/kg de SS, est particulièrement intéressante car elle présente un fort taux de conformité tous compartiments confondus malgré une valeur bien supérieure à la limite actuellement admise pour la mise en culture de racines et tubercules en vue de commercialisation. Nous étudions donc de façon plus détaillée les résultats obtenus sur ce dispositif.

Valeurs					
	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Écartype
Ando3	40	14,0	1	115,9	23,4
Fe	10	11,7	2,4	29,7	9,1
Pe	10	39,2	5,9	115,9	35,9
Pu	10	2,7	1	6,1	1,9
PuC	10	2,4	1	8,5	2,3
Total général	40	14,0	1	115,9	23,4

Tableau 42 : Igname - Concentration en chlordécone des échantillons végétaux sur la parcelle Ando3 (µg/kg de MF)

Sur la parcelle Ando3, la concentration maximale observée dans un tubercule entier est de 29.7 µg/kg de MF pour une moyenne de 11.7 µg/kg et 22.5% de non-conformité. La teneur maximale en chlordécone d'un tubercule est donc supérieure à la LMR mais bien inférieure à la LMP ; quant à la valeur moyenne, elle est bien inférieure à la LMR malgré une teneur moyenne en chlordécone de la parcelle de 1.5 mg/kg de SS soit 15 fois plus que la limite au-delà de laquelle cette culture est déconseillée. En ce qui concerne la pulpe, tous les échantillons sont conformes puisque la concentration maximale observée est de 6.1 µg/kg pour les pulpes crues et 8.5 µg/kg pour les pulpes cuites.

Nous nous intéressons maintenant à la ventilation des taux de conformité par compartiment végétal ; c'est-à-dire tubercule entier (Fe), peau, pulpe (cru) et pulpe cuite. A noter que la notion de conformité n'est, réglementairement parlant, applicable qu'au tubercule entier. Néanmoins, la valeur de 20 µg/kg de MF constitue une valeur de référence

et, dans le cadre de cette étude, nous utilisons donc le terme de « conformité » même pour les autres compartiments.

% <= 20µg (Fe et Pu)		Conformité	
ando	Compartiment	Total	%
Andosol	Fe	8	40%
	Pe	3	15,0%
	Pu	18	90,0%
	PuC	17	85,0%
Ferrisol+Nitisol	Fe	2	0%
	Pe	0	0,0%
	Pu	14	70,0%
	PuC	14	70,0%
Total général		60	47,5%

Tableau 43 : Igname - Taux de conformité par compartiment

La différence de comportement entre les différents compartiments est mise en évidence dans le Tableau 43. La peau est presque toujours non-conforme quel que soit le type de sol. Le tubercule entier est toujours non-conforme sur ferrisol-nitisol et conforme dans seulement 40% des cas sur andosol.

En revanche, les pulpes sont les plus souvent conformes en particulier sur andosol (90% des pulpes crues et 85% des pulpes cuites) mais également sur ferrisol-nitisol même si la fréquence de conformité est plus faible (70%).

Ceci est clairement en faveur de l'hypothèse d'un transfert privilégié de chlordécone du sol vers la peau par rapport à la pulpe.

6.2 Concentrations dans la peau et la pulpe par rapport au tubercule entier et au sol

La concentration en chlordécone dans le tubercule entier, [Fe], sert de référence à la comparaison avec la concentration dans la peau, [Pe], dans la pulpe, [Pu], et dans la pulpe cuite, [PuC].

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux deux grands types de sol séparément puis nous comparerons les résultats obtenus dans la partie 6.2.3 Comparaison andosol/ferrisol-nitisol.

6.2.1 Expérimentations sur andosol

Concernant les résultats des dispositifs sur andosol, nous obtenons les résultats suivants :

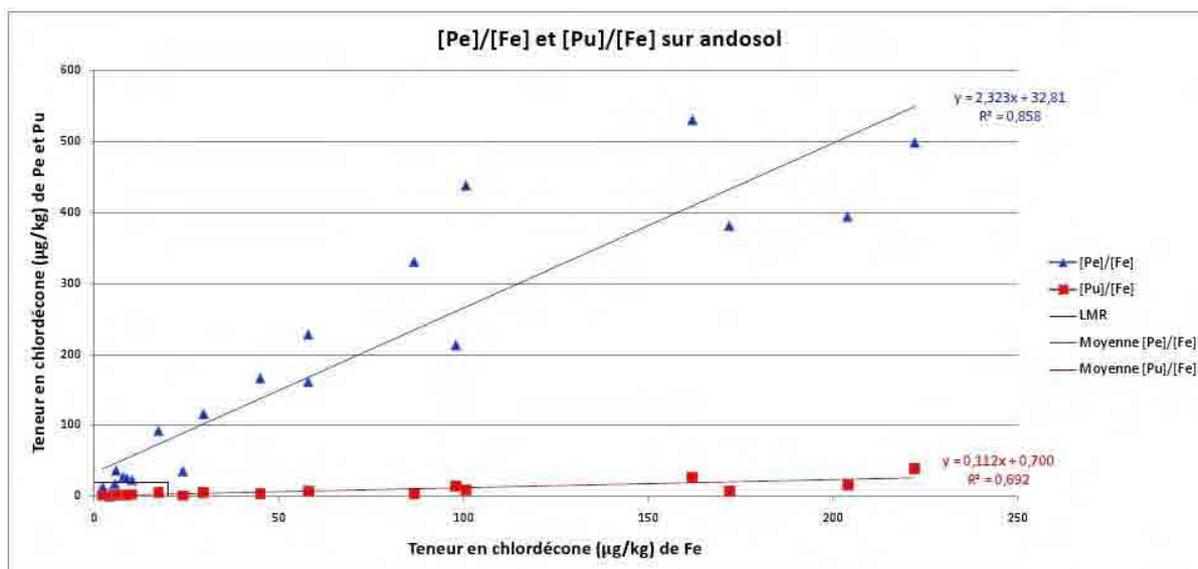


Figure 86 : Igname - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol

Sur le graphe (Figure 86), on voit clairement que très peu d'échantillons de peau et de tubercule entier sont conformes tandis que le nombre d'échantillons de pulpe conformes est nettement plus important.

D'une manière générale, nous constatons que la courbe de tendance concernant la relation concentration dans la peau / concentration dans le tubercule entier (courbe bleue, Figure 86) est très nettement au-dessus de celle relative à la pulpe et au tubercule entier (courbe rouge, Figure 86). Le comportement de la pulpe et celui de la peau vis-à-vis du transfert de chlordécone sont donc clairement différents. Il est difficile de donner une estimation de l'écart moyen de contamination entre la peau et la pulpe sur toute la plage de données. Néanmoins, on peut l'estimer de l'ordre d'un facteur dix. Cette très nette différence confirme l'hypothèse selon laquelle, **sur andosol, le transfert de chlordécone vers la peau est nettement privilégié**. Ceci pourrait être expliqué par un contact prolongé avec le sol pendant le cycle de culture.

Le coefficient de détermination pour la relation peau/tubercule entier est très bon ($r^2=0.86$). Pour la relation pulpe/tubercule entier, le coefficient de détermination est bon ($r^2=0.69$). Les résultats obtenus sont donc assez homogènes.

Les coefficients de corrélation, quant à eux, sont très bons aussi bien pour la relation peau/tubercule entier ($r=0.93$) que pour celle pulpe/tubercule entier ($r=0.83$). Sur andosol, il existe donc une relation linéaire très forte entre les concentrations dans la peau et la pulpe et celle dans le tubercule entier.

6.2.2 Expérimentations sur nitisol-ferrisol

Sur ferrisol-nitisol, la concentration en chlordécone du tubercule entier d'un échantillon d'igname (439 µg/kg de MF) n'est pas cohérente avec la teneur relevée dans la pulpe (18 µg/kg de MF). L'observation du nuage de points de l'ensemble des échantillons confirme que ce point est à écarter car probablement aberrant. L'étude des résultats présentée dans ce paragraphe 6.2 n'en tient donc pas compte.

Sur ferrisol et nitisol, nous obtenons les résultats suivants :

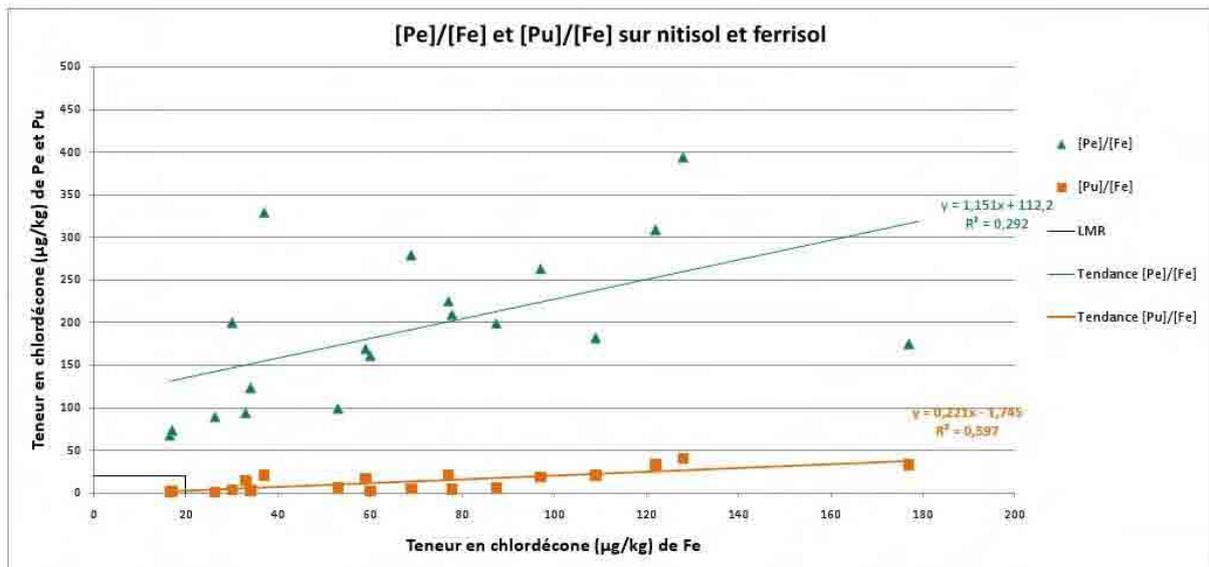


Figure 87 : Igname - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur ferrisol et nitisol

La lecture du graphe (Figure 87) confirme qu'aucun échantillon de peau d'igname n'est conforme sur ferrisol-nitisol. En revanche, nous constatons que quelques tubercules entiers sont conformes et que de nombreuses pulpes crues sont contaminées en deçà de la LMR.

Il existe une nette différence de comportement entre la peau et la pulpe, la courbe peau/tubercule entier (courbe verte Figure 87) est nettement au-dessus de celle pulpe/tubercule entier (courbe orange Figure 87). Comme sur andosol, **le transfert de chlorthaloxone est donc privilégié vers la peau**. Au vu de l'hétérogénéité des résultats relatifs à la peau, il est difficile de déterminer cet écart mais il serait de l'ordre d'un facteur 10.

La répartition des résultats concernant la relation peau/tubercule entier (points verts Figure 87) paraît assez hétérogène ce qui est confirmé par le coefficient de détermination ($r^2=0.29$), révélant une relation d'intensité moyenne. Concernant la relation pulpe/tubercule entier (points orange Figure 87), le coefficient de détermination $r^2=0.60$ indique une forte homogénéité.

La concentration dans la peau est liée à celle du tubercule entier par une relation linéaire forte ($r=0.54$). Il en est de même pour la relation entre la concentration dans la pulpe et celle du tubercule entier ($r=0.77$).

Les tests de corrélation réalisés séparément pour le ferrisol et le nitisol révèlent que, sur nitisol, la relation linéaire entre concentrations en chlorthaloxone dans la peau et le tubercule entier n'est pas avérée statistiquement. Or sur nitisol, nous avons une gamme de teneur du sol en chlorthaloxone (0.7 mg/kg de SS) et un écart-type de ces concentrations (0.3 mg/kg de SS) très faibles. Il est probable que l'effet conjugué de la variabilité de la réponse des plants au transfert de chlorthaloxone ainsi que l'erreur du laboratoire quand à la valeur de la teneur (30%) soit à l'origine de la très forte hétérogénéité des résultats.

Il serait intéressant d'obtenir des résultats sur une gamme de teneur de sol plus large.

6.2.3 Comparaison andosol/ferrisol-nitisol

Nous pouvons maintenant comparer les comportements observés sur les deux types de sols :

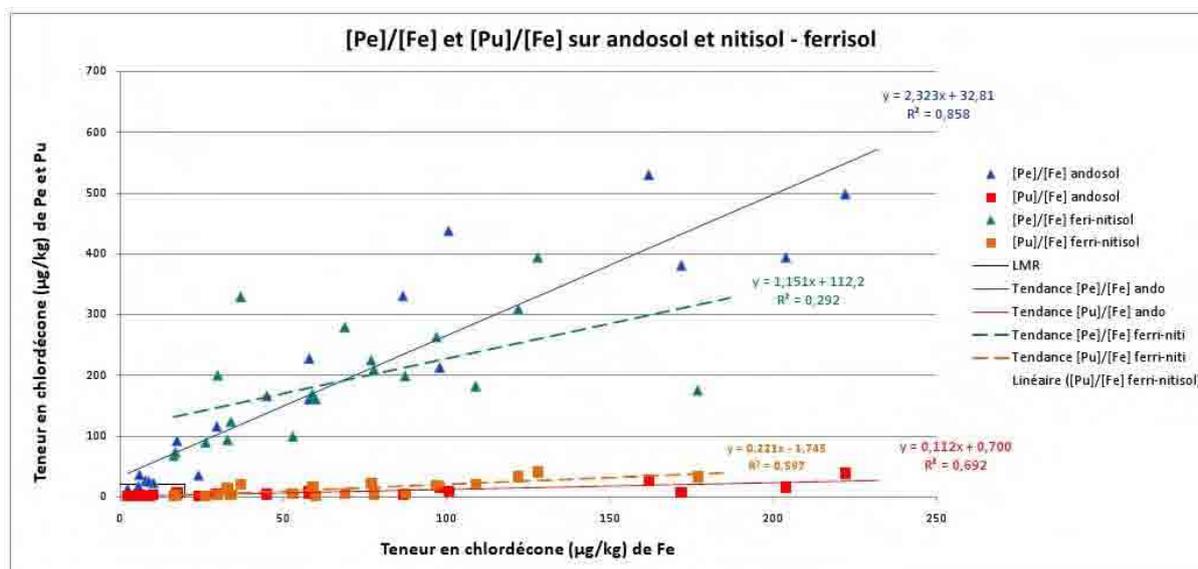


Figure 88 : Igname - Concentration dans Pe et Pu par rapport à [Fe] sur andosol et nitisol-ferrisol

Il est à rappeler que les coefficients de détermination et de corrélation sont bons sur andosol comme sur ferrisol-nitisol, même si l'hétérogénéité est plus importante sur ce deuxième type de sol.

Pour la pulpe, les comportements sur andosol et ferrisol-nitisol sont semblables comme le montrent les courbes [Pu]/[Fe] pour l'andosol (courbe rouge Figure 88) et pour le nitisol-ferrisol (courbe orange Figure 88) qui sont proches. La dispersion des deux nuages de points confirme la similitude des comportements.

Concernant les échantillons de peau, **le transfert privilégié vers la peau par rapport aux autres compartiments est confirmé, que ce soit sur andosol ou ferrisol-nitisol**, comme le montrent les courbes [Pe]/[Fe] pour l'andosol (courbe bleue Figure 88) et pour le nitisol-ferrisol (courbe verte Figure 88) qui sont nettement au dessus de celles relatives à la contamination de la pulpe.

Dans le cas de la relation peau/tubercule entier, il est difficile de comparer les transferts moyens sur ferrisol-nitisol et sur andosol en se basant sur les courbes de tendance. En effet, les droites sont sécantes à proximité de la médiane des échantillons. Néanmoins, les pentes des droites ne sont pas très différentes et les nuages de points sont globalement superposés sur leur gamme de valeurs de [Fe] commune. **Ce qui est en faveur d'un comportement similaire de la peau sur andosol et ferrisol-nitisol.**

Ces observations permettent donc de confirmer que la diffusion au sein du tubercule et la répartition de la chlrodécone dans la pulpe et dans la peau se font indépendamment de la nature du sol.

L'étude des coefficients de corrélation tous sols confondus (cf. annexe 9) met en exergue les relations fortes existant entre, d'une part, la teneur dans le tubercule entier et, d'autre part, celle dans la peau ($r=0.70$) et la pulpe ($r=0.59$). Le calcul des coefficients de détermination révèle une hétérogénéité des comportements tant pour la peau ($r^2=0.50$) que pour la pulpe ($r^2=0.35$).

6.2.4 Effet de la cuisson

Dans le cadre de ce programme de recherche, nous nous sommes également intéressés à l'impact de la cuisson sur la teneur en chlrodécone de la partie consommée, la pulpe. Nous allons donc comparer les résultats obtenus pour la pulpe crue (Pu) et la pulpe cuite (PuC). Nous commençons par les données obtenues sur andosol.

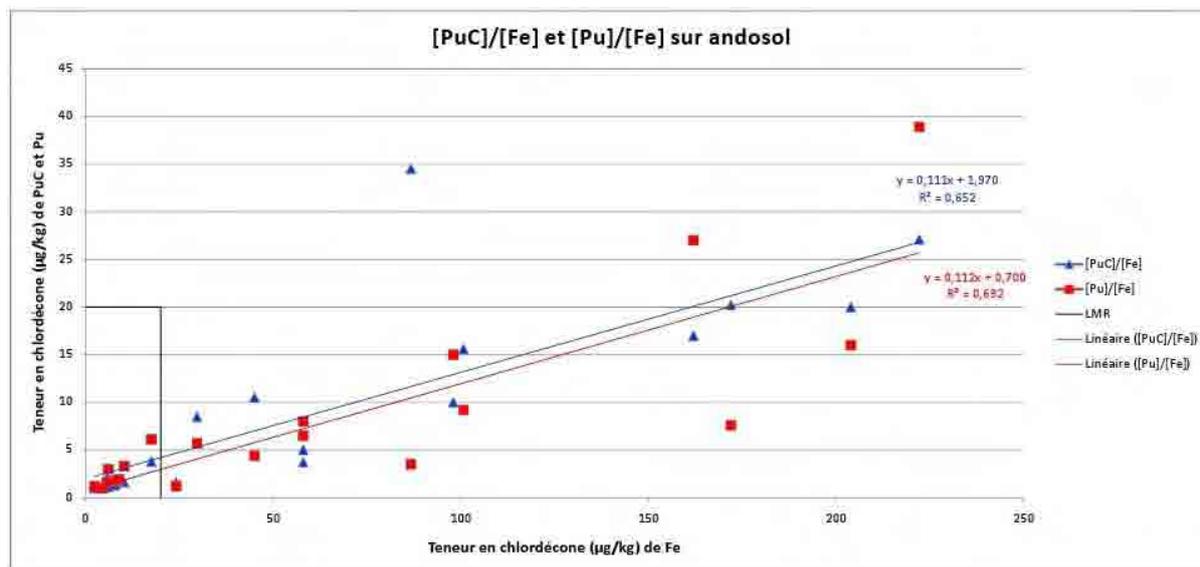


Figure 89 : Ignames - Concentration dans Pu et PuC par rapport à [Fe] sur andosol

Sur andosol, nous constatons que les comportements de la pulpe crue (courbe rouge Figure 89) et de la pulpe cuite (courbe bleue Figure 89) par rapport au transfert de chlrodécone sont similaires. En effet, l'écart entre les deux courbes est très faible.

Pour les mêmes raisons que précédemment (absence de normalité et d'indépendance), nous avons eu recours à un test de Friedman puis avons procédé à des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi (cf. annexe 9) afin de comparer les teneurs moyennes en chlrodécone dans la pulpe crue et dans la pulpe cuite.

La valeur de la p-value étant de 0,713, il nous est possible de conclure que, sur andosol, il n'existe pas de différence significative de teneurs en chlrodécone entre la pulpe crue et la pulpe cuite.

L'hétérogénéité des résultats est semblable dans le cas de la pulpe crue ($r^2=0.69$) et dans celui de la pulpe cuite ($r^2=0.62$). De même, les coefficients de corrélation sont très proches et ont des valeurs témoignant de la très forte relation linéaire entre les concentrations dans les pulpes et dans le tubercule entier ($r=0.83$ pour la pulpe et $r=0.80$ pour la pulpe cuite). Ce résultat est cohérent avec l'importance relative de la pulpe dans la masse d'un tubercule entier.

Sur andosol, nous pouvons donc considérer qu'il n'existe pas de différence de comportement entre la pulpe crue et la pulpe cuite par rapport au transfert de chlrodécone.

Nous étudions maintenant les données obtenues sur ferrisol et nitisol pour la pulpe crue et la pulpe cuite.

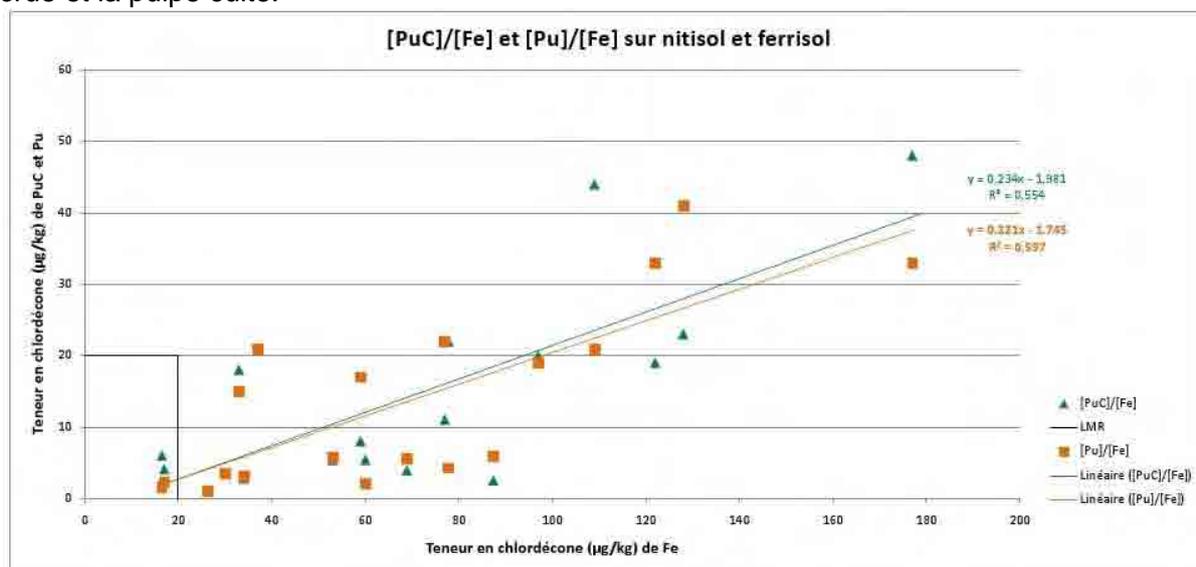


Figure 90 : Igname - Concentration dans Pu et PuC par rapport à [Fe] sur ferrisol et nitisol

Sur ferrisol et nitisol, le coefficient de détermination dans le cas de la pulpe cuite ($r^2=0.55$) est comparable à celui pour la pulpe crue ($r^2=0.60$), tous deux sont bons. On peut donc considérer que les courbes de tendance sont représentatives du comportement moyen.

La proximité des droites de tendance relatives à la pulpe crue (en orange Figure 90) et à la pulpe cuite (en vert Figure 90) est **en faveur de l'hypothèse de comportements similaires vis-à-vis du transfert de chlordécone.**

Comme sur andosol, afin de comparer les teneurs moyennes en chlordécone dans la pulpe crue et dans la pulpe cuite, nous avons réalisé un test de Friedman puis des comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Nemenyi en raison de l'absence de normalité et d'indépendance (cf. annexe 9).

La valeur de la p-value étant de 0,9, il nous est possible de conclure que, sur ferrisol-nitisol, il n'existe pas de différence significative de teneurs en chlordécone entre la pulpe crue et la pulpe cuite.

Sur ferrisol-nitisol, la pulpe cuite et la pulpe crue d'igname tendent à avoir un comportement similaire vis-à-vis du transfert de chlordécone.

6.2.5 Conclusions

La comparaison des concentrations en chlordécone dans la pulpe et dans la peau par rapport à celle observée dans le tubercule entier nous permet d'étudier la répartition de la chlordécone entre pulpe et peau au sein du tubercule. **Concernant le compartiment pulpe, la répartition dans l'igname est similaire sur andosol et sur ferrisol-nitisol.** Concernant la peau, la comparaison est plus difficile, mais néanmoins en faveur de comportements similaires sur les deux types de sols. **La diffusion et la répartition de la chlordécone au sein du tubercule ne dépendent donc pas de la nature du sol.**

L'épluchage du tubercule permet, dans le cas de l'igname, de diminuer très nettement l'exposition du consommateur par rapport aux teneurs observées dans le tubercule entier. L'écart entre les concentrations en chlordécone dans la peau et dans la pulpe semble être de l'ordre d'un facteur 10. L'étude des transferts sol-plante en partie 6.3 permettra de confirmer ou invalider cette hypothèse. La croissance de l'organe consommé

entièrement enfoui dans le sol est probablement à l'origine du **transfert nettement privilégié de chlordécone du sol vers la peau par rapport à la pulpe**.

La pulpe présente sur andosol une teneur en chlordécone inférieure à la LMR dans 85% (pulpe cuite) à 90% (pulpe crue) des échantillons étudiés dans le cadre de cette étude et ce malgré les forts niveaux de pollution des parcelles expérimentales (5.6 mg/kg de SS en moyenne). Sur ferrisol-nitisol, 70% des pulpes sont conformes ; ce qui est également élevé pour une contamination moyenne des parcelles de 2.2 mg/kg de SS. En revanche, le taux de tubercules entiers conformes est assez bas sur andosol (40%) et très bas sur ferrisol-nitisol (10%). **Ces observations sont en faveur de l'hypothèse d'un transfert plus important sur ferrisol-nitisol que sur andosol.**

Par ailleurs, l'étude des résultats obtenus pour les pulpes crues et cuites indiquent qu'il n'existe pas de différence statistique de contamination, **la cuisson n'a donc pas d'impact significatif sur la concentration en chlordécone de la pulpe**. Cette constatation est cohérente avec le peu d'affinité de la molécule pour l'eau et sa grande stabilité à la chaleur.

6.3 Transferts sol-plante

Nous allons maintenant nous intéresser à la relation entre concentration dans le végétal et teneur du sol en chlordécone. Concernant les pulpes, nous nous limitons à l'étude de la pulpe crue, le comportement de la pulpe cuite étant relativement similaire.

Après sélection des points pertinents, les courbes de transferts maxima obtenues passent toutes à proximité du point (0 ; 0), le choix a donc été fait de « forcer » le passage des courbes par ce point afin de rendre compte de la proportionnalité existant entre les concentrations en chlordécone dans les différents compartiments et les teneurs dans le sol. De plus, cela permet une comparaison plus aisée des pentes des courbes et donc des transferts.

6.3.1 Comparaison andosol et nitisol-ferrisol

Nous commençons par étudier le transfert de chlordécone du sol vers le tubercule entier.

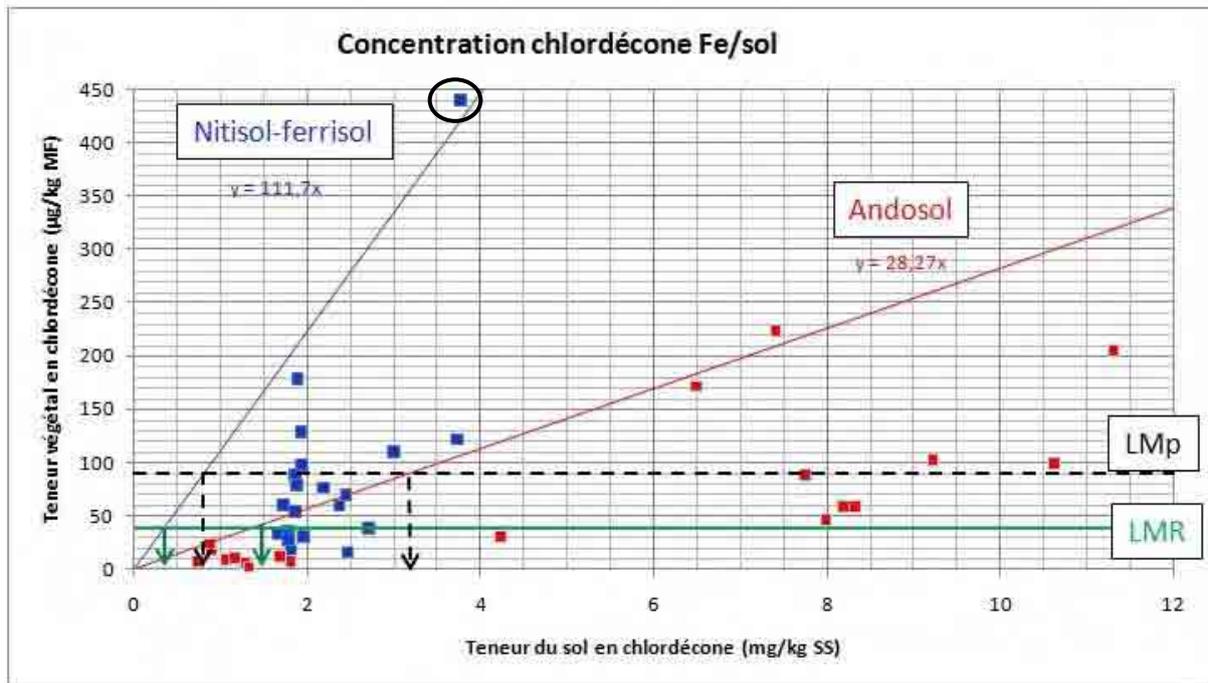


Figure 91 : Igname - [Fe]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Pour plus de lisibilité, seuls les transferts maxima sont représentés sur le graphique (Figure 91). Les tests de corrélation (cf. Annexe 9) montrent que le coefficient de détermination est fort pour la relation tubercule entier/sol aussi sur andosol ($r^2=0.54$) et moyen sur ferrisol-nitisol ($r^2=0.37$). Les valeurs des coefficients de corrélations confirment l'existence d'une relation linéaire forte sur andosol ($r=0.73$) et sur ferrisol-nitisol ($r=0.61$) entre la teneur en chlordécone du tubercule entier et celle observée dans le sol. Entouré en noir, figure le point écarté lors de l'étude des résultats dans le paragraphe précédent.

Les transferts maxima sont nettement différents sur andosol (courbe rouge, Figure 91) et ferrisol-nitisol (courbe bleue, Figure 91). Il est à noter que le transfert maximum sur ferrisol-nitisol tient compte du point précédemment écarté. En effet, celui-ci ne conduit pas à une surestimation du taux de transfert. La courbe relative aux données obtenues sur ferrisol-nitisol est nettement au-dessus de celle concernant l'andosol. Globalement, la pente des courbes est élevée, reflet d'un transfert important de chlordécone du sol vers le tubercule. Sur ferrisol-nitisol ($y=111.7x$) le transfert maximum a une pente environ quatre fois plus importante que sur andosol ($y=28.27x$). **Ces valeurs correspondent à des transferts de chlordécone du sol vers le tubercule entier de l'ordre de 11% sur andosol et 3% sur ferrisol-nitisol.** Lors du calcul du taux de transfert, il ne faut pas oublier que la teneur du sol s'exprime en mg/kg ce qui est 1000 fois supérieur à l'unité dans laquelle on exprime la concentration en chlordécone dans les végétaux, le µg/kg.

La concentration maximale du sol en deçà de laquelle, le tubercule entier d'igname sera conforme est de 0.7 mg/kg sur andosol et 0.18 mg/kg sur ferrisol-nitisol. Concernant la LMp, les teneurs maximales du sol sont de 1.7 mg/kg sur andosol et 0.45 mg/kg sur ferrisol-nitisol.

Nous nous intéressons maintenant au comportement de la peau en fonction de la teneur du sol en chlordécone (Figure 92).

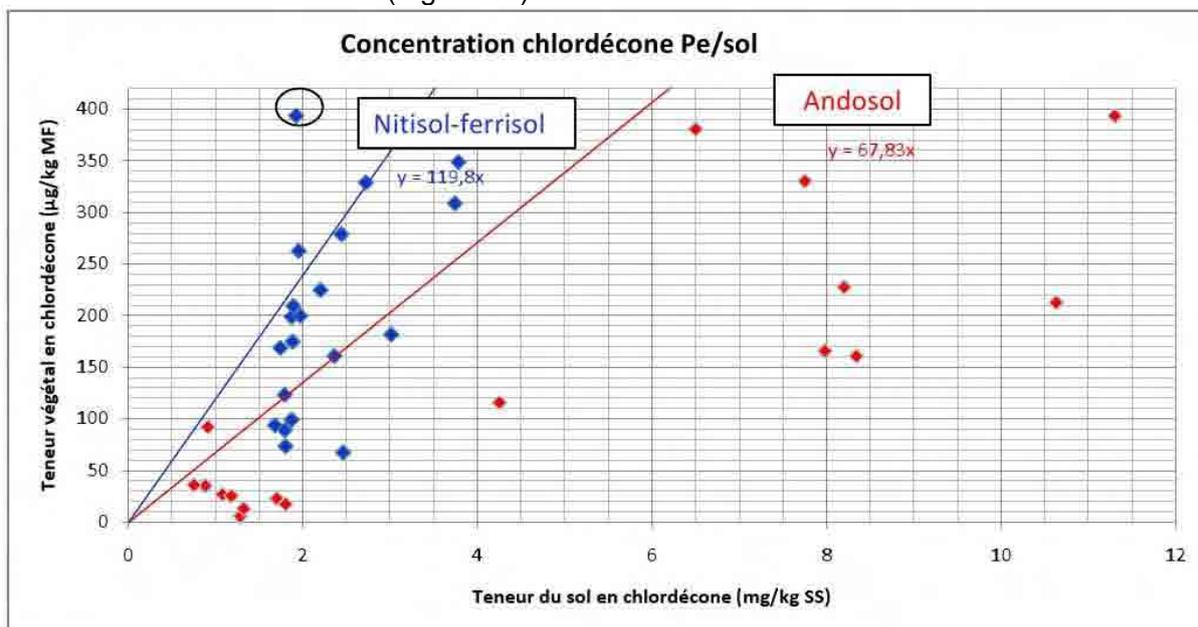


Figure 92 : Igname - [Pe]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Etant donné l'échelle du graphique, la LMR et la LMp ne sont pas représentées sur le graphique.

Les tests de corrélation pour l'igname (cf. Annexe 9) révèlent une bonne homogénéité sur andosol ($r^2=0.7$). En revanche, sur ferrisol-nitisol, l'hétérogénéité est nettement plus importante ($r^2=0.27$). Les coefficients de corrélation correspondants confirment une relation linéaire très forte entre les concentrations dans le sol et dans la peau sur andosol ($r=0.84$). Sur ferrisol-nitisol, la relation linéaire est forte ($r=0.52$).

Le transfert maximum sur ferrisol-nitisol ne tient pas compte du point entouré en noir, déjà écarté au paragraphe 6.2, qui se détache nettement des autres points de la courbe enveloppe.

La courbe de transfert maximum sur andosol (courbe rouge Figure 92) est nettement en-dessous de celle relative aux prélèvements sur ferrisol-nitisol (courbe bleue Figure 92). **Sur ferrisol-nitisol ($y=119x$), le transfert de chlordécone du sol vers la peau est de 12% soit environ deux fois plus important que sur andosol où il est de 7% ($y=68x$).**

Le risque de dépassement de LMR pour la peau apparaît pour des concentrations du sol en chlordécone de 0.17 mg/kg sur ferrisol-nitisol et 0.3 mg/kg sur andosol, ce qui reste dans une même gamme de valeurs (0.1 à 0.5 mg/kg de SS). La LMp peut elle être atteinte pour des teneurs du sol de 0.4 mg/kg sur ferrisol-nitisol et 0.7 mg/kg sur andosol.

Pour finir, nous étudions les transferts de chlordécone du sol vers la pulpe qui est le compartiment consommé.

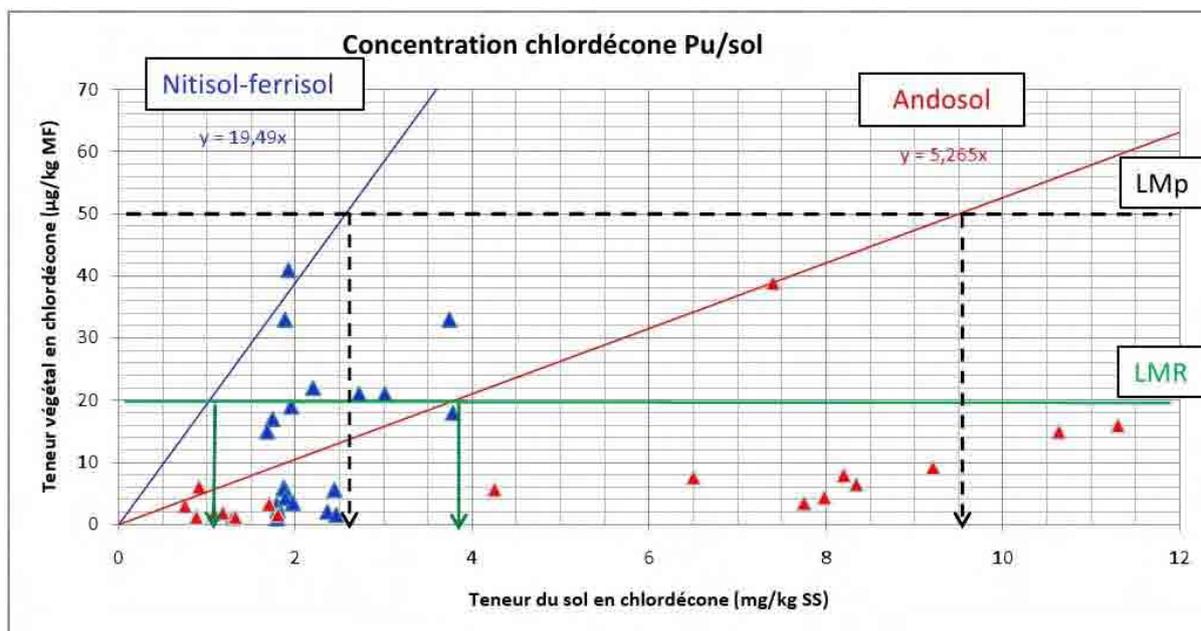


Figure 93 : Igname - [Pu]/[sol] sur andosol et ferrisol-nitisol

Nous constatons visuellement la forte hétérogénéité des résultats sur ferrisol-nitisol. Ceci est confirmé par le très faible coefficient de détermination ($r^2=0.1$) déterminé par un test de corrélation (cf. annexe 9). La valeur du coefficient de corrélation n'est, quant à elle, pas différente de 0 à un niveau de signification $\alpha=0.05$. La relation linéaire entre les concentrations en chlordécone dans la pulpe et dans le sol n'est donc pas vérifiée statistiquement sur ferrisol-nitisol. L'absence de corrélation linéaire sur ferrisol-nitisol est due au faible intervalle de valeurs des teneurs de sol en chlordécone sur cette parcelle (1.7 mg/kg SS à 3.8 mg/kg SS) associé à l'incertitude des résultats d'analyse des laboratoires et à la variabilité de la réponse de la plante qui aboutissent à obtenir graphiquement un positionnement en colonne des points.

Sur andosol, les tests de corrélation (cf. Annexe 9) montrent une assez bonne homogénéité ($r^2=0.44$) de la relation entre les concentrations dans le sol et dans la pulpe. En outre, cette relation linéaire est forte ($r=0.67$).

Comme pour le tubercule entier et la peau, la courbe de transfert maximum pour le ferrisol (courbe bleue, Figure 93) est nettement au dessus de celle pour l'andosol (courbe rouge, Figure 93). Le transfert sol/pulpe sur ferrisol-nitisol est de l'ordre de 2% ($y=19x$) tandis que, sur andosol, il est de l'ordre de 0.5% ($y=5x$). Le transfert sol-pulpe est donc quatre fois plus important sur ferrisol-nitisol que sur andosol.

Le risque de « non-conformité » de la pulpe d'igname apparaît pour des sols contaminés à 3.8 mg/kg de SS sur andosol et 1 mg/kg de SS sur ferrisol-nitisol. Le risque de dépassement de la LMp apparaît pour des teneurs du sol en chlordécone de 9.5 mg/kg de SS sur andosol et 2.5 mg/kg de SS sur ferrisol-nitisol.

6.3.2 Comparaison entre compartiments

L'étude en détail des transferts maxima pour chaque compartiment et type de sol ne revêtant pas d'intérêt particulier, nous nous intéressons à la comparaison des courbes de transfert maximum obtenues sur andosol pour les trois compartiments (Figure 94).

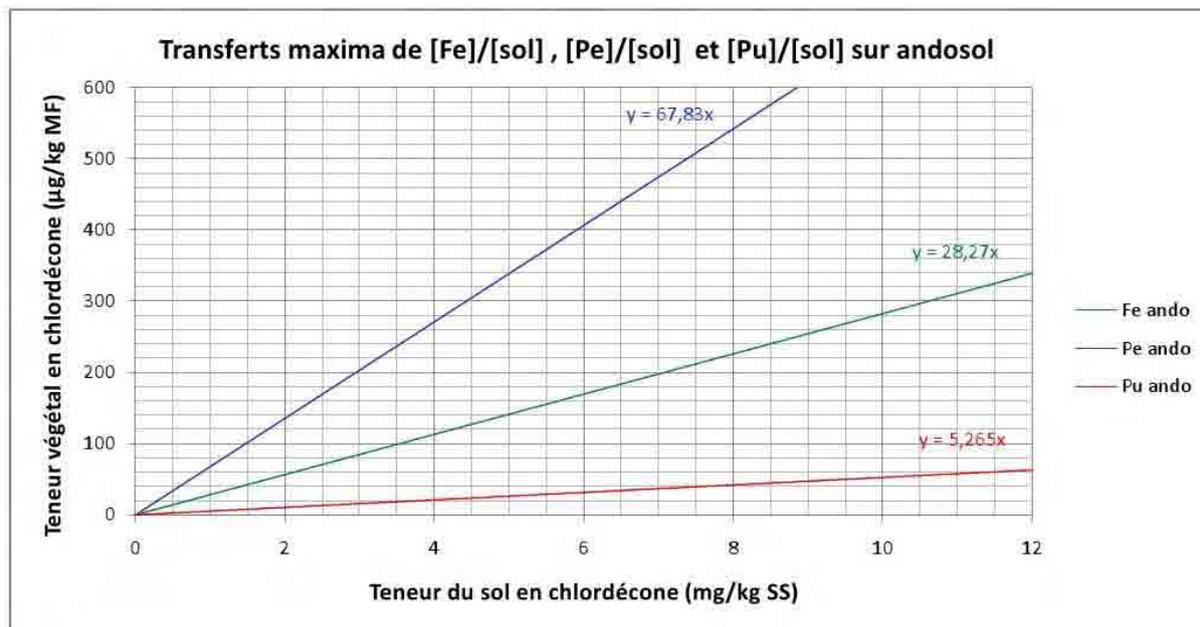


Figure 94 : Igname – Transferts maxima des différents compartiments sur andosol

Le transfert maximum sol-peau (courbe bleue, Figure 94) est très nettement au dessus de celle du transfert maximum sol-pulpe (courbe rouge, Figure 94), la courbe du transfert sol-tubercule entier (courbe verte, Figure 94) est, quant à elle, logiquement entre les deux.

Nous constatons qu'il existe un coefficient multiplicateur proche de deux entre les transferts maxima sol-tubercule entier et sol-peau. Concernant les transferts sol-pulpe et sol-tubercule entier, le coefficient est de l'ordre de 5. En effet, les taux transferts maxima sont de l'ordre de 0.5% pour la pulpe, 3% pour le tubercule entier et 7% pour la peau.

Dans le cas de l'igname, le transfert de chlordécone du sol vers la plante se fait donc de manière nettement privilégiée en faveur de la peau, compartiment en contact avec le sol.

Concernant le tubercule entier et la peau, ces taux sont comparables à ceux observés pour la patate douce (8% pour la peau et 3.5% pour le tubercule entier). En revanche, le transfert vers la pulpe est plus faible dans le cas de l'igname (0.5%) que dans celui de la patate douce (2%). La peau d'igname, nettement plus épaisse que celle de la patate douce, pourrait constituer un meilleur rempart au passage de la chlordécone du sol vers la pulpe.

Sur ferrisol-nitisol (Figure 95), des résultats similaires peuvent être observés avec des taux de transferts différents.

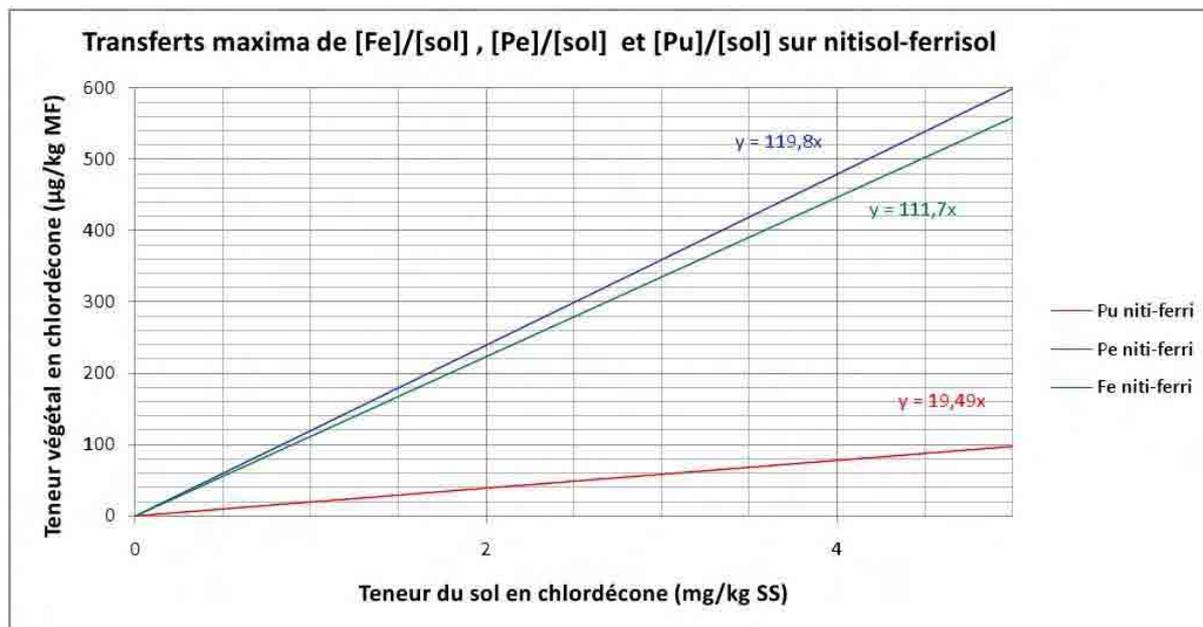


Figure 95 : Igname – Transferts maxima des différents compartiments sur ferrisol-nitisol

Sur ferrisol-nitisol, les taux de transferts maxima sont supérieurs à ceux déterminés sur andosol.

Nous observons que les transferts maxima vers la peau et le fruit entier sont très proches néanmoins le comportement de la pulpe est lui bien distinct. **L'existence d'un transfert privilégié vers la peau par rapport à la pulpe est donc confirmée.**

Les transferts maxima obtenus dans le cadre de cette étude sur sols très contaminés par la chlordécone sont :

- 2% du sol vers la pulpe,
- 11% du sol vers le tubercule entier,
- 12% du sol vers la peau.

6.3.3 Conclusions

L'étude des données obtenues sur igname permet de conclure que le comportement des différents compartiments du tubercule vis-à-vis du transfert de chlordécone diffère sur andosol et ferrisol. Même si les tendances restent les mêmes, les valeurs limites, elles, sont différentes. Comme pour les autres racines et tubercules étudiés, **le transfert sol-plante est nettement plus important sur ferrisol-nitisol que sur andosol.**

Sur andosol, nous observons un **transfert maximum de chlordécone du sol vers la plante, de l'ordre de 0.5% pour la pulpe, il est de 3% pour le tubercule (fruit entier) et 7% pour la peau.**

Sur ferrisol-nitisol, les transferts de chlordécone sont de 2% du sol vers la pulpe, 11% du sol vers le tubercule et de 12% du sol vers la peau, ce qui est environ deux au quatre fois supérieur aux transferts observés sur andosol.

Ces taux de transfert sont relativement similaires à ceux observés sur patate douce est inférieurs à ceux relatifs au dachine.

Même sur ferrisol-nitisol, ces résultats sont nettement inférieurs à la valeur de référence de 20% généralement admise pour le transfert maximum sol-plante des racines et tubercules ; cette valeur ayant été calculée toutes cultures confondues. Néanmoins, s'agissant de faibles teneurs de chlordécone dans le sol, les valeurs seuils

déterminées pour peau et tubercule entier d'igname sur ferrisol-nitisol sont proches de la limite de 0.1 mg/kg de SS.

Enfin, l'existence d'une contamination privilégiée de la peau par rapport à la pulpe est à souligner. En effet, le rapport entre le transfert maximum vers la pulpe est six à seize fois moins important que celui vers la peau.

6.4 Préconisations envisagées

La contamination étant nettement plus importante pour la peau que la pulpe, l'épluchage permet de diminuer significativement l'exposition du consommateur. Le nettoyage méticuleux des tubercules est également à promouvoir.

Par ailleurs, au vu des taux de transfert maximum de chlordécone du sol vers les différents compartiments du tubercule, il convient de préconiser **d'éviter la culture d'igname sur les sols contaminés au-delà de 0.18 mg/kg** quel que soit le type de sol afin de limiter le risque de dépassement de la LMR des produits commercialisés et consommés.

Ce résultat est un peu moins limitant que la limite de 0.1 mg/kg de sol sec généralement admise d'autant plus que si l'on s'intéresse à la partie consommée, c'est-à-dire à la pulpe, la limite passe alors à 1 mg/kg de SS pour les ferrisol-nitissols et 3.8 mg/kg de SS pour les andosols.

7 Bilan et perspectives

Il est important de rappeler qu'étant donnés les objectifs de santé publique de cette étude, nous avons cherché à caractériser, non pas le transfert moyen de chlordécone vers les produits mais le transfert maximum afin limiter les risques pour le consommateur.

7.1 Résultats généraux

Transfert sol-plante : transfert maximum

L'ensemble des résultats confirment la grande variabilité, d'une part, de la pollution du sol à l'échelle d'une parcelle et, d'autre part, de la réponse des plantes d'une même espèce et d'une même variété. Cela implique la nécessité de réaliser un grand nombre d'échantillons. En outre, le plus fort pouvoir contaminant pour la culture d'un ferrisol-nitisol par rapport à un andosol est confirmé. Il est donc important de s'intéresser à ces deux grands types de sols pour toute étude du transfert.

Par ailleurs, les travaux menés sous serre ont montré l'importance du potentiel contaminant du transfert par diffusion. Le transfert par contact reste probablement la principale source de contamination pour les racines et tubercules. Néanmoins, sous certaines conditions, le transfert par diffusion peut conduire, à lui seul, à des contaminations supérieures à la LMR.

Quelle que soit l'espèce considérée, les transferts de chlordécone vers la plante sont plus importants sur ferrisol-nitisol que sur andosol.

Les résultats obtenus sur cucurbitacées dans le cadre du programme JAJA confirment l'hypothèse selon laquelle le transfert du sol vers le produit consommé dépend de l'espèce cultivée. En effet, les giraumons sont plus sensibles au transfert de chlordécone du sol vers la plante que les concombres.

Le transfert maximum pour les **concombres** est de l'ordre de 0.05% sur andosol et 1% sur ferrisol-nitisol, ils sont donc nettement moins sensibles que les légumes racines dont le transfert maximum sol-plante est de 20%. Pour la chlordécone, la LMR étant fixée à 20 µg/kg, la teneur maximale du sol en chlordécone pour obtenir 100% de conformité se situe autour de 2 mg/kg sur nitisol-ferrisol et 4 mg/kg sur andosol.

La maximisation du transfert par diffusion liée aux conditions de culture sous serre (favorisation du développement de la biomasse) ne permet pas de préjuger de l'impact qu'aurait une pratique culturale visant à empêcher le transfert par contact en conditions « classiques ». Il serait donc nécessaire de conduire des essais en champ avec tuteurage des plants et/ou paillage plastique (ou naturel) pour évaluer la diminution de transfert que pourraient entraîner de telles pratiques (diminution de la concentration en chlordécone de la peau tout en maintenant une diffusion faible dans la pulpe).

Le transfert maximum est un peu plus important dans le cas du **giraumon** que dans celui du concombre. Il est de l'ordre de 3% (fruit entier), la mise en culture du giraumon est donc déconseillée au-delà de 0.7 mg/kg de SS.

Les transferts maxima observés pour les trois **racines et tubercules** étudiés mettent en exergue la variabilité inter-espèces mais aussi l'influence du type de sol. D'autre part, l'étude des différents compartiments (tubercule entier, peau, pulpe) confirme que la répartition de la chlordécone au sein de l'organe récolté n'est pas homogène.

Les tableaux 44 et 45 récapitulent les résultats obtenus.

	Andosol		Ferrisol-nitisol	
	Tubercule entier	Pulpe	Tubercule entier	Pulpe
Patate douce	3.5%	2%	7%	5%
Igname	3%	0.5%	11%	2%
Dachine	10%	4.5%	20%	20%

Tableau 44 : Tableau récapitulatif des taux de transferts maxima

	Andosol		Ferrisol-nitisol	
	Tubercule entier (mg/kg SS)	Pulpe (mg/kg SS)	Tubercule entier (mg/kg SS)	Pulpe (mg/kg SS)
Patate douce	0.6	1	0.3	0.4
Igname	0.7	3.8	0.18	1
Dachine	0.2	0.45	0.1	0.1

Tableau 45 : Tableau récapitulatif des teneurs limites des sols en chlordécone pour la mise en culture (mg de chlordécone par kg de SS)

Nous constatons que les taux de transferts maxima sont bien différents en fonction de l'espèce. Cette variabilité est probablement liée à la nature de l'organe consommé (racine ou tige) ainsi qu'à l'épaisseur, la structure et la composition de la peau.

Enfin, le transfert le plus important est de 20%, il n'y a donc pas de bioaccumulation dans les organes de réserve des espèces étudiées. Ces plantes ne peuvent donc pas être utilisées pour une dépollution de site.

Nous rappelons que l'étude détaillée du cas de la parcelle Ando3 (4.1.2 et 6.1.2) montre que les transferts maxima ont des valeurs très protectrices pour le consommateur, bien

différentes du comportement moyen observé en parcelle. Pour la patate douce, par exemple, l'écart entre transfert moyen et transfert maximum est de l'ordre d'un facteur deux.

Les transferts maxima observés sur patate douce et igname sont inférieurs aux valeurs jusqu'à présent admises comme référence (teneur limite du sol en chlordécone à 0.1 mg/kg de SS pour la culture de racines et tubercules). Concernant le dachine, cette valeur seuil est atteinte. Dans le cadre d'une communication grand public, la valeur de référence de 0.1 mg/kg de SS pour la mise en culture des racines et tubercules reste donc valable. Il est néanmoins envisageable d'affiner les recommandations, au cas par cas, notamment pour les agriculteurs, en fonction du type de sol et de la culture afin d'être moins restrictif.

Effet de l'épluchage et différence pulpe-peau

Pour toutes les cultures étudiées, l'étude des relations entre teneur dans la peau ou la pulpe et teneur dans le fruit entier a permis de confirmer l'hypothèse d'un transfert par diffusion au sein de la plante indépendant du type de sol.

Dans le cas du **concombre**, il n'existe pas ou peu de différence nette de contamination de la peau par rapport à la pulpe. L'épluchage permet néanmoins de diminuer l'exposition du consommateur aux valeurs les plus élevées, celles-ci étant plus fréquentes dans la peau que dans la pulpe en raison de la forte hétérogénéité de la réponse de ce compartiment au transfert.

En revanche, l'analyse des résultats obtenus sur **giraumon** nous permet de conclure que le comportement du giraumon vis-à-vis du transfert de chlordécone du sol vers la plante est différent de celui du concombre. En effet, les compartiments de l'organe récolté n'ont pas le même comportement : le transfert de chlordécone vers la peau est privilégié par rapport à celui vers la pulpe. La pulpe est nettement moins contaminée que la peau. Ceci pourrait être dû à la structure de la peau, plus épaisse et plus vascularisée, ainsi qu'à la durée du cycle plus longue que celle du concombre.

Par ailleurs, concernant les **racines et tubercules** (cf. Tableau 44 et Tableau 45), l'étude de l'impact d'un épluchage généreux avant cuisson sur la teneur en chlordécone a permis de confirmer la moindre contamination de la pulpe par rapport à la peau et d'élaborer des préconisations orientant les consommateurs vers cette pratique y compris pour la patate douce. Les calculs d'exposition du consommateur à la chlordécone via l'alimentation sont basés sur la contamination du tubercule entier, l'exposition réelle via les végétaux est donc généralement surestimée.

Effet de la cuisson

La cuisson, quant à elle, ne diminue pas la contamination de la pulpe ce qui est cohérent avec le fait que la molécule de chlordécone n'ait que très peu d'affinité avec l'eau et qu'elle ne soit dégradée qu'à très haute température (plus de 1000° C). Il est donc déconseillé de rallonger le temps de cuisson des aliments. Cette pratique n'a aucun effet sur le teneur en chlordécone en revanche, elle réduit les qualités nutritionnelles des produits.

En résumé :

Résultats	Conséquences
Transfert maximum >> transfert moyen	Surestimation du risque
Transfert andosol >> transfert ferrisol-nitisol	Risque zéro basé sur résultats ferrisol-nitisol = surestimation du risque sur andosol
Contamination sol>>contamination production végétale	Soins à la récolte
Transfert peau >> transfert tubercule entier >> transfert pulpe	Epluchage protecteur
Cuisson sans effet	Pratique usuelle

Résultats complémentaires « hors Jafa »

Les résultats obtenus dans le cadre du volet recherche du programme Jafa sont cohérents avec les données des études précédemment menées au Cirad Martinique et à l'Inra Guadeloupe sur le transfert de chlordécone vers les racines et tubercules (Achard et al, 2007).

Concernant le dachine, le transfert maximum observé au champ est légèrement inférieur à 20% sur ferrisol-nitisol et de l'ordre de 7% sur andosol pour le tubercule entier.

Pour le tubercule entier de patate douce sous serre, les taux sont de l'ordre de 3-4% sur ferrisol-nitisol et 2% sur andosol.

Sur igname, l'étude séparée des différents compartiments a également permis de conclure à une moindre contamination de la pulpe par rapport au tubercule entier et à la peau (épluchure).

Il est à noter qu'aucune de ces expérimentations n'avait d'effectif d'échantillons aussi important que celle qui fait l'objet du présent rapport.

7.2 Perspectives

Ces résultats fournissent des éléments simples à mettre en avant dans le cadre d'une communication grand public :

- récolte dans des contenants propres, nettoyage soigneux des produits et épluchage généreux ;
- pas de cuisson prolongée ;
- mise en culture à éviter sur des sols contaminés en chlordécone au-delà de 0.1 mg/kg de SS pour les racines et tubercules et au-delà de 1 mg/kg de SS pour les cucurbitacées.

La pulpe étant la partie consommée, il serait intéressant d'ouvrir une discussion sur la teneur maximale du sol en chlordécone pour laquelle il est possible de cultiver certaines espèces (giraumonts, racines et tubercules) sans risque pour la santé. En effet, dans le cadre des jardins familiaux qui ne sont pas assujettis à la législation relative aux denrées commercialisées (LMR relative au produit entier), il serait possible de prendre en compte une teneur maximale plus élevée en considérant que le compartiment de référence est la pulpe et non le tubercule entier. Cela permettrait de limiter le nombre de foyers dont les habitudes (alimentaires, d'approvisionnement et de choix de cultures) devraient être modifiées, tout en

respectant les recommandations de l'Anses en termes d'exposition à la chlordécone par l'alimentation et celles de diversification alimentaire. Ces propositions sont basées sur le fait que l'on se situe dans un contexte de risque zéro avec des LMR protectrices par rapport aux recommandations de l'Anses et des transferts maxima sol-plante utilisés pour le calcul des teneurs maximales dans le sol.

Les connaissances actuelles concernant les transferts de chlordécone du sol vers les différentes cultures permettent de proposer au consommateur des produits de substitution non sensibles au transfert pour limiter leur consommation de racines et tubercules. La plupart des produits maraîchers hors cucurbitacées (au sol) peuvent être cultivés quelle que soit la teneur du sol en chlordécone (tomate, aubergine, haricot vert, gombo, chou, divers pois). De même, le fruit à pain, les bananes (y compris ti nain et plantain) et plus généralement les produits issus d'arbres fruitiers sont peu voire pas sensibles à la contamination par la chlordécone. L'impact d'une diversification, plus ou moins dirigée vers des produits « non contaminables », sur l'exposition des consommateurs serait à étudier.

D'un point de vue agronomique, un certain nombre de connaissances complémentaires sont encore nécessaires notamment :

- à propos des pratiques de tuteurage et de paillage ;
- concernant la culture des cucurbitacées sur des sols assez faiblement pollués (0.1 à 1 mg/kg de SS) pour évaluer l'effet seuil ;
- sur la répartition de la molécule de chlordécone au sein des organes afin notamment de mieux connaître l'impact de l'épaisseur de l'épluchage ainsi que les moteurs et voies du transfert au sein de la plante.

7.3 Partenariat avec l'association SEVE

Nous avons démarré fin 2009 un partenariat avec SEVE pour obtenir des résultats complémentaires sur les variétés auxquelles nous nous intéressons tout particulièrement (giraumon et concombre), sur d'autres variétés que celles sur lesquelles nous avons travaillé (*Dioscorea bulbifera* pour les ignames dont les bulbilles aériennes pourraient constituer une alternative aux tubercules cultivés dans le sol) et sur d'autres espèces traditionnellement cultivées en jardins familiaux pour lesquelles nous manquons de données (laitue et cive dans le cadre de l'action 30 du PNAC).

Un essai de tuteurage des concombres et de paillage des giraumons a été mis en place fin 2010 avec des plants témoins cultivés de manière classique afin de conforter la préconisation de ces modes de culture en vue d'une diminution de l'exposition du consommateur à la chlordécone. L'objectif de cette expérimentation est d'offrir des solutions agronomiques simples à mettre en œuvre dans les jardins voire les exploitations agricoles pour diminuer le transfert de chlordécone vers les organes consommés (ou commercialisés). Les résultats de cet essai comprenant quelques réplifications sont attendus mi-2011.

Des plants d'igname bulbifère (*Dioscorea bulbifera*) ont été mis en culture en partenariat avec l'association SEVE courant 2010. L'analyse des résidus de chlordécone dans les bulbilles récoltées nous a fourni des premiers éléments d'évaluation de leur sensibilité au transfert sol-plante comparée à celle de tubercules d'igname. Les concentrations relevées dans les 12 échantillons sont le plus souvent nulles. Lorsque la chlordécone a été détectée, les teneurs sont de l'ordre de quelques microgrammes par kilogramme de matière fraîche. Les bulbilles d'igname sont donc peu sensibles au transfert de chlordécone. Au vu de ces résultats, il faudrait s'intéresser aux qualités gustatives d'un tel produit et à son acceptabilité par la population comme culture de substitution.

Les premières cives et laitues ont été prélevées en fin d'année 2009 et début 2010. L'analyse des résidus de chlordécone dans les différents échantillons, nous a permis d'établir des taux de transfert maximum. Pour les cives comme pour les laitues, ces taux sont du même ordre que ceux observés sur cucurbitacées : 2% dans le cas de la laitue et 2.5% dans celui des cives.

7.4 Etudes sur les mécanismes du transfert

Il est également nécessaire de renforcer la connaissance des mécanismes du transfert de chlordécone du sol vers les différentes parties de la plante.

Connaître les voies de contamination de la plante en chlordécone permettrait d'adapter les techniques culturales et les systèmes de culture de manière à réduire le niveau de contamination. La voie de transfert de la chlordécone à la plante est étudiée avec des molécules marquées sur des plantes modèles (dont la courgette) dans le cadre du projet ANR CES Chlordexco³².

En parallèle à cette étude, des expérimentations sont menées pour mieux connaître les transferts de chlordécone au sein des plantes (racines, tige, feuilles) et comparer le comportement de différentes espèces.

Par ailleurs différents essais sont en cours afin d'évaluer l'effet de l'ajout de matière organique au sol. En effet, cette pratique entraîne une diminution du transfert vers la plante en raison de l'affinité de la chlordécone pour la matière organique présente dans le sol.

Au regard de ces résultats, des méthodes alternatives de culture, adaptées aux jardins familiaux, pourraient être élaborées et diffusées auprès des particuliers et agriculteurs.

³² Pollution des sols et des eaux par la chlordécone aux Antilles, conséquences sur la contamination des cultures et des organismes dulçaquicoles

Références bibliographiques :

ACHARD R, 2006 ; Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture – Rapport final d'exécution 2006 INRA – CIRAD ; pp 55-67

ACHARD R., CABIDOUCHE Y.M., CARON A., NELSON R., DUFEAL D., LAFONT A., LESUEUR-JANNOYER M., 2007, Contamination des racines et tubercules cultivés sur sol pollué par la chlordécone aux Antilles - Les cahiers du PRAM n°7 – Décembre 2007, pp 44-50

CABIDOUCHE Y.M, 2006 ; Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture – Rapport final d'exécution 2006 INRA – CIRAD ; pp 49-53

CABIDOUCHE Y.M., ACHARD R., CATTAN P., CLERMONT DAUPHIN C., MASSAT F., SANSOULET J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies : a simple leaching model accounts for current residue, *Environmental pollution*, 157 : 1697-1705

CATTAN P, BARRIUSI E, CABIDOUCHE Y.M, Charlier J.B, Voltz M, Pollutions des sols par la chlordécone : impact sur la qualité des milieux et des produits agricoles - Les cahiers du PRAM n°7, Décembre 2007, pp 13-20

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA MARTINIQUE ET D LA GUADELOUPE, 2003, Manuel du planteur, CaraïbEdiprint, 106p

CHHIKARA, S.; PAULOSE, B.; WHITE, J.C.; PARKASH DHANKHER, O. 2010. Understanding the Physiological and Molecular Mechanism of Persistent Organic Pollutant (POP) Uptake and Detoxification in Cucurbit Species (Zucchini and Squash). *Environ. Sci. Technol.* In press.

DESCAS Blaise-Gérard, 1995, Le Jardin Familial Créole – culture maraîchères et vivrières verger – éditions Désormeaux, p153

GENT, M.P.N.; WHITE, J.C.; EITZER, B.D.; MATTINA, M.I. 2007. Modeling the difference among cucurbita in uptake and translocation of p,p'-dichlorodiphenyldichloroethylene. *Environ. Tox. Chem.* 12:2476-2485

Holland, B., Unwin, I.D. & Buss, D.H., 1991. Vegetables, herbs and spices. The fifth supplement to McCance & Widdowson's *The Composition of Foods*. 4th Edition. Royal Society of Chemistry, Cambridge, United Kingdom. 163 pp.

INRA, <http://www.inra.fr/presse/ignames>

LESUEUR JANNOYER M, 2007, Pollutions des sols par la chlordécone : impact sur la qualité des milieux et des produits agricoles – Les cahiers du PRAM n°7 – Décembre 2007, pp 7-12

Ping L, Kam-Chau W, Zhu-Tian L, 2002. Estimation of whole plant transpiration of bananas using sap flow measurements. *J. Exp. Bot.* (2002) 53(375): 1771-1779

WHITE, J.C.. 2010. Inheritance of p,p'-DDE Phytoextraction Ability in Hybridized Cucurbita pepo Cultivars. Environ. Sci. Technol.(Submitted for publication)

WHITE, J.C. 2009. Optimizing planting density for p,p'-DDE phytoextraction by Cucurbita pepo. Environ. Engin. Sci. 26, 369-375.

WOIGNIER T, 2004, Les stocks de carbone dans les sols des Antilles : importance agronomique et environnementale – Les cahiers du PRAM n°4, Décembre 2004, p22

WOIGNIER T, Primera J, Rangon, L, Dieudonné P, 2006, L'agro-environnement, une science à toute les échelles – Les cahiers du PRAM n° 6, Décembre 2006, pp 7-10