

SÉBASTIEN ROUANE

**DOSES MINIMALES BIOLOGIQUEMENT  
EFFICACES POUR LE DÉSHERBAGE DANS LA  
ROTATION DE MAÏS-SOYA TOLÉRANTS AU  
GLYPHOSATE ET AU GLUFOSINATE**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en biologie végétale  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE PHYTOLOGIE  
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2009

## Résumé

Une étude ayant pour objectif d'évaluer différentes séquences d'herbicides en condition de doses réduites, a été mise en place à la station agronomique de l'Université Laval pendant trois ans. Huit séquences culturales de maïs (*Zea mays*) et de soya (*Glycine max*) tolérant au glyphosate et au glufosinate ont été testées avec quatre doses d'herbicides.

Les résultats montrent que l'emploi du glufosinate trois ou deux années de suite en remplacement d'une utilisation continue du glyphosate paraît difficilement envisageable. Des problèmes de répression et des baisses de rendement sont visibles en présence d'une flore mixte (présence de graminées annuelles en particulier). L'utilisation de doses réduites de glufosinate n'est pas conseillée pour les mêmes raisons. Concernant le glyphosate, une réduction d'un quart de la dose homologuée semble réalisable du point de vue des rendements des cultures, mais présente toutefois un risque d'augmentation de la banque de graines au bout de deux années d'utilisation répétée.

## **Avant-Propos**

Je tiens à remercier ici toutes les personnes ayant participé à ce projet de maîtrise. Tous mes remerciements vont à mon directeur de recherche, le docteur Gilles D. Leroux, professeur au Département de phytologie de l'Université Laval, qui m'a permis de mener à bien cette maîtrise. Ses nombreux conseils et sa grande expérience de la malherbologie m'ont été d'un grand secours tout au long des deux ans et demi de travail. Je remercie aussi chaleureusement ma codirectrice, Marie-Josée Simard chercheuse en malherbologie au Centre de recherche et développement sur les sols et les grandes cultures d'Agriculture et Agroalimentaire Canada de Québec, pour sa participation majeure dans le volet banque de semence de ce projet. Ses conseils judicieux en écologie des mauvaises herbes ont grandement contribué à la réussite de ce volet. Gilles, Marie-Josée, je vous remercie tous deux pour votre formidable encadrement lors des deux congrès où les résultats préliminaires de ce projet ont été présentés (Mont-Tremblant, 2007 et Banff, 2008).

Les résultats présentés dans ce mémoire ne seraient pas ce qu'ils sont sans le travail des équipes de recherche. Merci à Susanne Buhler, professionnelle de recherche au Département de phytologie pour son grand professionnalisme et ses conseils de qualité sur toute la méthodologie de ce projet. Merci également à Francis Gagnon, pour la précision et la rigueur de son travail, mais aussi pour sa bonne humeur à toute épreuve. Tous deux ont permis la mise en place et la réussite des essais, à la ferme de l'Université Laval. Pour la partie technique du volet banque de semence, je tiens à remercier Geneviève Bégin professionnelle de recherche au Centre de recherche et développement sur les sols et les grandes cultures d'Agriculture et Agroalimentaire Canada de Québec. Son soutien technique a été un élément déterminant pour la réussite de cette partie du projet. Merci également à tous les étudiants de premier cycle qui ont contribué au bon déroulement du projet.

Je tiens également à témoigner ma reconnaissance à Agriculture et Agroalimentaire Canada et au Centre pour la lutte antiparasitaire (CLA) qui ont rendu possible le financement de ce projet au travers du Programme de réduction des risques liés aux pesticides. Je remercie également le Centre de recherche et développement sur les sols et les grandes cultures

d'Agriculture et Agroalimentaire Canada de Québec et le Département de phytologie de l'Université Laval.

Je n'oublierai pas mes compagnons de route avec lesquels j'ai passé de très bons moments sur le terrain ou dans les laboratoires de l'Université. Dans le désordre, et pour n'en citer que quelques uns, merci à François, Amélie et Mathieu, Louis, Rolland, Marine, Marie-Ève, Michaël, Sandrine, Pierre-Antoine (PA), Mathieu, Valérie, Vincent... et à tous ceux que j'ai eu le plaisir de connaître tout au long de ces mois de travail.

Merci à tous les membres de ma famille et de ma belle-famille pour leurs encouragements à distance. Ils ont tous été pour moi un support indispensable pour la réussite de ce projet. Pour terminer, je souhaite remercier tout particulièrement mon épouse, Stéphanie, pour son grand soutien à la reprise et à la réussite de mes études. Sa présence et sa patience dans les moments difficiles furent déterminantes. Son inspiration m'apporte tous les jours le souffle nécessaire à la réussite de mes projets. Au-delà du diplôme, nous avons tous deux vécu une expérience merveilleuse de ce côté de l'Atlantique. Je souhaite que les liens que nous avons établis avec le Québec restent privilégiés dans les années à venir.

*À mon épouse, ma famille et tous mes amis  
québécois...*

## Table des matières

Résumé.....	ii
Avant-Propos .....	iii
Table des matières .....	vi
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	x
Introduction générale.....	1
1. Revue de littérature.....	4
1.1 Le désherbage chimique au moyen d’herbicides non sélectifs dans le maïs et le soya 4	
1.1.1 Historique, importance et enjeux .....	4
1.1.1.1 Adoption dans le monde, au Canada et au Québec.....	4
1.1.1.2 Importance et enjeux des cultures tolérantes aux herbicides.....	6
1.1.2 Le glyphosate et le glufosinate d’ammonium.....	7
1.1.2.1 Mode et spectre d’action.....	7
1.1.2.2 Toxicité environnementale .....	8
1.1.2.3 Les cultivars résistants aux herbicides non sélectifs.....	9
1.1.3 Stratégies de désherbage associées aux herbicides non sélectifs.....	10
1.1.3.1 Le désherbage en postlevée .....	10
1.1.3.2 Applications séquentielles .....	11
1.1.3.3 Applications avec un herbicide résiduel .....	12
1.2 Problématiques actuelles et changements futurs .....	13
1.2.1 La résistance des mauvaises herbes au glyphosate.....	13
1.2.1.1 État des lieux de la résistance .....	13
1.2.1.2 Prévention de la résistance.....	15
1.2.2 Impact environnemental et sanitaire des herbicides .....	17
1.2.2.1 Le programme de réduction des risques liés aux pesticides .....	17
1.2.2.2 La réduction des doses d’herbicide.....	18
1.3 La banque de graines de mauvaises herbes dans le sol.....	20
1.3.1 La méthode de séparation des semences et du sol.....	21
1.3.2 La méthode de germination et d’émersion des semences .....	23
1.3.3 La méthode mixte .....	24
1.4 Références bibliographiques.....	26
2. Étude de doses réduites de glyphosate et de glufosinate d’ammonium dans diverses séquences de maïs et de soya : impacts culturels .....	34
2.1 Résumé.....	34
2.2 Introduction.....	35
2.3 Méthodologie expérimentale .....	37
2.3.1 Localisation et disposition du site expérimental.....	37
2.3.2 Protocole et dispositif expérimental .....	38
2.3.3 Variables étudiées .....	42
2.3.3.1 Phytotoxicité .....	42
2.3.3.2 Recouvrement des mauvaises herbes et répression des espèces dominantes.....	42
2.3.3.3 Biomasse sèche aérienne par espèces de mauvaises herbes .....	43

2.3.3.4	Rendement en grain du maïs et du soya .....	44
2.3.4	Analyses statistiques .....	45
2.3.4.1	Analyse en mesures répétées avec la procédure MIXED .....	45
2.3.4.2	Tests statistiques .....	47
2.4	Résultats et discussion : Impact des séquences et des doses d'herbicide .....	49
2.4.1	Le recouvrement et la répression des mauvaises herbes.....	49
2.4.1.1	Recouvrement global le jour du traitement.....	49
2.4.1.2	Répression de <i>Chenopodium album</i> .....	53
2.4.1.3	Répression d' <i>Ambrosia artemisiifolia</i> .....	57
2.4.1.4	Répression des graminées annuelles.....	61
2.4.2	La biomasse sèche aérienne des mauvaises herbes .....	65
2.4.2.1	Biomasse sèche des dicotylédones annuelles .....	65
2.4.2.2	Biomasse sèche des graminées annuelles .....	69
2.4.3	Rendement en grain des cultures .....	73
2.5	Conclusion et discussion.....	78
2.6	Références bibliographiques.....	81
3.	Étude de doses réduites de glyphosate et de glufosinate d'ammonium dans diverses séquences de maïs et de soya : impact sur la banque de semences de mauvaises herbes.....	83
3.1	Résumé.....	83
3.2	Introduction.....	84
3.3	Méthodologie expérimentale .....	86
3.3.1	Essai préliminaire .....	86
3.3.2	Justification de l'utilisation d'une méthode mixte en chambre de croissance.....	86
3.3.3	Échantillonnage et prélèvement de sol .....	87
3.3.4	Protocole et dispositif expérimental .....	88
3.3.4.1	Le prélèvement et stockage au froid.....	88
3.3.4.2	Les chambres de croissance.....	90
3.3.4.3	Support de culture et irrigation .....	92
3.3.4.4	Températures pour la germination.....	94
3.3.4.5	Tamissage.....	94
3.3.4.6	Comptage des germinations de mauvaises herbes.....	97
3.3.4.7	Mesure de la banque viable totale sur un sous-échantillon .....	98
3.3.4.8	Test de viabilité au sel de tetrazolium .....	98
3.3.5	Variables étudiées.....	100
3.3.5.1	Viabilité totale des graines.....	100
3.3.5.2	Étude quantitative de la banque de semences.....	100
3.3.6	Analyses statistiques avec la procédure MIXED.....	101
3.4	Résultats et discussion .....	102
3.4.1	Efficacité de la méthode utilisée.....	102
3.4.1.1	Répartition des levées .....	102
3.4.1.2	Pourcentage de graines levées .....	103
3.4.2.	Étude quantitative de la banque de semences.....	106
3.4.2.1	Nombre de graines levées de dicotylédones annuelles.....	106
3.4.2.2	Nombre de graines levées de graminées annuelles.....	108
3.4.2.3	Nombre de graines levées total par échantillon.....	111
3.5	Conclusion .....	115
3.6	Références bibliographiques.....	118

Discussion générale et conclusions.....	120
ANNEXES.....	125
Annexe 2.1 Données météorologiques en 2006.....	126
Annexe 2.2 Données météorologiques en 2007.....	127
Annexe 2.3 Données météorologiques en 2008.....	128
Annexe 2.4 Protocole expérimental.....	129
Annexe 2.5 Schéma du plan de champ.....	130
Annexe 2.6 Calendrier des évaluations réalisées au champ.....	131
Annexe 2.7 Calcul du rendement.....	133
Annexe 2.8 Calcul du rendement relatif.....	134
Annexe 2.9 Matrice des coefficients des contrastes.....	137
Annexe 2.10 Programmation détaillée de l'analyse statistique dans le logiciel SAS® 138	
Annexe 2.11 Analyses statistiques pour le recouvrement des mauvaises herbes.....	139
Annexe 2.12 Analyses statistiques pour la répression de <i>Chenopodium album</i> .....	140
Annexe 2.13 Analyses statistiques pour la répression d' <i>Ambrosia artemisiifolia</i> .....	141
Annexe 2.14 Analyses statistiques pour la répression des graminées annuelles.....	142
Annexe 2.15 Analyses statistiques pour la biomasse sèche des dicotylédones annuelles 143	
Annexe 2.16 Analyses statistiques pour la biomasse sèche des graminées annuelles	144
Annexe 2.17 Analyses statistiques du rendement relatif des cultures.....	145
Annexe 3.1 Analyse statistique de la banque de semences.....	146
Annexe 3.2 Températures des chambres de croissance.....	147
Annexe 3.3 Codes des noms d'adventices.....	148
Annexe 3.4 Analyses statistiques de la banque de graines.....	149

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1-1</b> Chronologie des mauvaises herbes résistantes au glyphosate (Tardif 2005) ..	14
<b>Tableau 2-1</b> Localisation et caractéristiques édaphiques du site expérimental (couche 0-20 cm) .....	37
<b>Tableau 2-2</b> Séquences culturales (parcelles principales) évaluées de 2006 à 2008.....	38
<b>Tableau 2-3</b> Doses utilisées selon la culture/herbicide en 2006, 2007 et 2008.....	38
<b>Tableau 2-4</b> Date de semis et d'émergence des cultures en 2006, 2007 et 2008.....	40
<b>Tableau 2-5</b> Fertilisation du maïs en 2006, 2007 et 2008.....	40
<b>Tableau 2-6</b> Conditions d'application des traitements dans le maïs en 2006, 2007 et 2008.....	41
<b>Tableau 2-7</b> Conditions d'application des traitements dans le soya en 2006 et 2007.....	41
<b>Tableau 2-8</b> Calendrier des évaluations pour chaque année.....	42
<b>Tableau 2-9</b> Décomposition des sources de variation du modèle.....	46
<b>Tableau 2-10</b> Contraste a priori des séquences culturales pour les deux hypothèses de recherche.....	47
<b>Tableau 2-11</b> Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance du pourcentage du recouvrement total le jour du traitement.....	50
<b>Tableau 2-12</b> Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance du pourcentage de répression de <i>Chenopodium album</i> à 2, 5 et 8 SAT.....	54
<b>Tableau 2-13</b> Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance du pourcentage de répression d' <i>Ambrosia artemisiifolia</i> à 2, 5 et 8 SAT.....	58
<b>Tableau 2-14</b> Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance du pourcentage de répression des graminées annuelles à 2, 5 et 8 SAT.....	62
<b>Tableau 2-15</b> Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance de la biomasse sèche des dicotylédones annuelles à 8 et 16 SAT.....	66
<b>Tableau 2-16</b> Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance de la biomasse sèche des graminées annuelles à 8 et 16 SAT.....	70
<b>Tableau 2-17</b> Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance des rendements relatifs.....	74
<b>Tableau 3-1</b> Description des graines des principales espèces du site.....	95

## Liste des figures

<b>Figure 1-1</b> Superficie au Canada des cultures génétiquement modifiées, de 1996 à 2005 en milliers d'hectares (Brookes & Barfoot 2006). .....	5
<b>Figure 1-2</b> Proportion des surfaces en maïs génétiquement modifié et tolérant aux herbicides en comparaison avec les surfaces de maïs non génétiquement modifiées, au Canada en 2005 (Brookes & Barfoot 2006). .....	5
<b>Figure 1-3</b> Proportion des surfaces en soya génétiquement modifié tolérant aux herbicides en comparaison avec les surfaces de soya non génétiquement modifié, au Canada en 2005 (Brookes & Barfoot 2006). .....	5
<b>Figure 1-4</b> Classification des modes et sites d'actions des herbicides en fonction du risque de sélection de résistance (Beckie 2006). .....	13
<b>Figure 1-5</b> Schéma de la réduction du sel de tétrazolium .....	23
<b>Figure 2-1</b> Plan de l'essai transposé sur l'image satellite du site. ....	39
<b>Figure 2-2</b> Disposition dans une parcelle des quadrats pour la récolte des biomasses sèches .....	43
<b>Figure 2-3</b> Pourcentage de recouvrement total le jour du traitement dans les parcelles non traitées et traitées chaque année à la dose d'herbicide $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X pour les huit séquences culturales testées. ....	51
<b>Figure 2-4</b> Pourcentage de recouvrement total le jour du traitement dans les parcelles non traitées et traitées chaque année à la dose d'herbicide $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X pour les trois années de cultures. ....	52
<b>Figure 2-5</b> Pourcentage de répression du <i>Chenopodium album</i> à 2, 5 et 8 SAT dans les parcelles traitées chaque année à $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X la dose d'herbicide pour les huit séquences culturales testées. ....	55
<b>Figure 2-6</b> Pourcentage moyen de répression de <i>Chenopodium album</i> à 5 SAT dans les parcelles traitées à $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1X la dose d'herbicide ; moyenne des trois années de la séquence culturale. ....	56
<b>Figure 2-7</b> Pourcentage de répression d' <i>Ambrosia artemisiifolia</i> à 2, 5 et 8 SAT dans les parcelles traitées chaque année à $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X la dose d'herbicide pour les huit séquences culturales testées. ....	59
<b>Figure 2-8</b> Pourcentage moyen de répression d' <i>Ambrosia artemisiifolia</i> à 5 SAT dans les parcelles traitées à $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1X la dose d'herbicide ; moyenne des trois années de la séquence culturale. ....	60
<b>Figure 2-9</b> Pourcentage de répression des graminées annuelles à 2, 5 et 8 SAT dans les parcelles traitées chaque année à $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X la dose d'herbicide pour les huit séquences culturales testées. ....	63
<b>Figure 2-10</b> Pourcentage moyen de répression des graminées annuelles à 5 SAT dans les parcelles traitées à $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1X la dose d'herbicide ; moyenne des trois années de la séquence culturale. ....	64
<b>Figure 2-11</b> Biomasse sèche des dicotylédones annuelles à 8 et 16 SAT dans les parcelles non traitées et traitées chaque année à la dose $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X pour les huit séquences culturales testées (note : l'échelle des graphiques diffère entre la dose 0X et les parcelles traitées). .....	67

<b>Figure 2-12</b> Biomasse sèche moyenne des dicotylédones annuelles à 8 SAT dans les parcelles traitées à la dose d'herbicide $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1X et non traitées ; moyenne des trois années de la séquence culturale. ....	68
<b>Figure 2-13</b> Biomasse sèche des graminées annuelles à 8 et 16 SAT dans les parcelles non traitées et traitées chaque année à la dose $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X pour les huit séquences culturales testées (note : l'échelle des graphiques diffère entre la dose 0X et les parcelles traitées). ....	71
<b>Figure 2-14</b> Biomasse sèche moyenne des graminées annuelles à 8 SAT dans les parcelles traitées à la dose d'herbicide $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1X et non traitées ; moyenne des trois années de la séquence culturale. ....	72
<b>Figure 2-15</b> Rendement en grain (Mg/ha) dans les parcelles en monoculture de maïs traité chaque année à la dose d'herbicide 0 X, $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X. ....	75
<b>Figure 2-16</b> Rendement en grain du maïs (Mg/ha) et du soya (kg/ha) pour les séquences culturales en rotation maïs/soya traitées chaque année à 0 X, $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X la dose d'herbicide. ....	76
<b>Figure 2-17</b> Rendement relatif moyen de chaque séquence culturale, exprimé en % du traitement de référence, pour les doses d'herbicide 0 X, $\frac{1}{2}$ X, $\frac{3}{4}$ X et 1 X. ....	77
<b>Figure 3-1</b> : Calcul du volume de sol prélevé par rapport au volume total d'une parcelle expérimentale (à 15cm de profondeur). ....	89
<b>Figure 3-2</b> Disposition dans une parcelle des prélèvements de sol ....	89
<b>Figure 3-3</b> Chambre de croissance montrant la disposition des échantillons de sol de 2007 (vue de haut). ....	91
<b>Figure 3-4</b> Chambre de croissance montrant la disposition des échantillons de sol de 2006 (vue de haut). ....	92
<b>Figure 3-5</b> Schéma du contenu des pots montrant l'échantillon concentré de sol. ....	93
<b>Figure 3-6</b> Description détaillée des tamis. ....	96
<b>Figure 3-7</b> Répartition des levées par espèce et par période de germination. ....	102
<b>Figure 3-8</b> Pourcentage de graines levées par rapport au nombre total de graines viables. ....	104
<b>Figure 3-9</b> Nombre de graines de dicotylédones annuelles levées par échantillon en 2006 et 2007 suivant la séquence et la dose utilisée. ....	107
<b>Figure 3-10</b> Moyenne des graines levées de dicotylédones annuelles par échantillon suivant la séquence et la dose utilisée. ....	107
<b>Figure 3-11</b> Nombre de graines de graminées annuelles levées par échantillon en 2006 et 2007 suivant la séquence et la dose utilisée. ....	110
<b>Figure 3-12</b> Moyenne des graines levées de graminées annuelles par échantillon selon la dose utilisée. ....	110
<b>Figure 3-13</b> Nombre de graines levées total par échantillon en 2006 et 2007 suivant la séquence et la dose utilisée. ....	113
<b>Figure 3-14</b> Moyenne du nombre de graines levées total par échantillon suivant la séquence et la dose utilisée. ....	113
<b>Figure 3-15</b> Moyenne du nombre total de graines par échantillon suivant la dose utilisée et l'année. ....	114

## Introduction générale

Depuis les dix dernières années, le développement de cultures génétiquement modifiées n'a cessé de croître au Québec, au Canada et dans le monde. L'introduction de cultures tolérantes aux herbicides non sélectifs en représente la part la plus importante. La principale cause de ce succès réside dans l'utilisation d'un herbicide puissant, faiblement nocif et peu coûteux : le glyphosate. Cette matière active est souvent qualifiée de « pesticide du siècle » en raison de son utilisation massive et historique à travers le monde. Son homologation pour le désherbage des cultures en postlevée au milieu des années 1990 a marqué le début de profonds changements dans la gestion des mauvaises herbes dans les cultures de canola (*Brassica napus*), de coton (*Gossypium hirsutum*), de maïs (*Zea mays*) et de soya (*Glycine max*).

Les producteurs ayant adopté cette technologie ont considérablement simplifié leurs techniques de désherbage grâce au traitement unique en postlevée. Le travail réduit du sol, la diminution du coût du désherbage et la réduction du risque environnemental font partie des éléments secondaires qui ont fait le succès de cette technique. Malgré cela, en 2009, le bilan de cette méthode semble en réalité plus mitigé. D'une part, la simplification du désherbage a eu pour effet indirect de réduire la gestion de la résistance chez les mauvaises herbes et d'autre part de freiner le développement de nouvelles matières actives sur le marché des herbicides.

Ces deux conséquences, très liées, sont les enjeux majeurs qui attendent la communauté agricole dans les prochaines années. Du côté des fabricants, le développement d'un nouvel herbicide aussi efficace et peu coûteux que le glyphosate semble difficile et d'autant plus lent que le coût de sa fabrication et de sa commercialisation augmente année après année. Chez les producteurs, le changement d'attitude ne se fait souvent qu'à partir du moment où la résistance d'une mauvaise herbe est déjà établie. Pourtant, d'autres solutions existent.

Le glufosinate d'ammonium est le seul autre herbicide non sélectif qui présente une utilisation similaire, mais avec un mode d'action différent du glyphosate. Toutefois, son utilisation est restée faible, dû à son coût plus élevé, son efficacité moins complète et ses conditions d'applications plus rigoureuses que le glyphosate. Au Québec, pour l'instant, la résistance au glyphosate chez les adventices n'est pas encore établie et la gestion préventive de ce problème doit se faire dès maintenant. Dans ce contexte et malgré ses défauts, le glufosinate serait l'élément clé de cette gestion préventive.

L'apparition d'hybrides de maïs tolérants aux deux herbicides non sélectifs permet, depuis 2006, un choix de traitement entre le glyphosate et le glufosinate en cours de culture. Cet outil est un premier pas important qui permettrait une utilisation alternée des deux matières actives plus facilement. La question est maintenant de savoir si le glufosinate procure un désherbage alternatif comparable au glyphosate. Il s'agit du premier enjeu de cette étude et pour y répondre notre première approche sera de comparer des séquences de cultures/herbicides employant les deux herbicides en rotation ou non.

Le deuxième contexte de cette étude repose sur l'impact des pesticides pour la santé humaine, les risques pour la biodiversité, pour l'air, l'eau et le sol. Les gouvernements fédéral et provincial souhaitent limiter cet impact et l'adoption de doses réduites pour le désherbage des grandes cultures en est un élément important. Le but de ce programme est de déterminer des stratégies antiparasitaires réalisables, avantageuses sur le plan tant économique (répression des mauvaises herbes et rendements) qu'environnemental et ayant le plus grand potentiel quant à leur mise en œuvre par les producteurs.

Au Québec, certains producteurs utilisent déjà des doses réduites d'herbicide pour des raisons à la fois financières et environnementales. Mais cette pratique est problématique pour plusieurs raisons. D'une part, les fabricants ne s'engagent pas sur les résultats à des doses non homologuées et les assurances de cultures ne prennent pas en charge les dommages découlant d'une perte de rendement. D'autre part, on connaît mal les effets agronomiques à moyen terme de ce type de désherbage notamment sur les rendements, mais aussi sur les changements floristiques au sein des parcelles ou encore sur la banque de

graines des mauvaises herbes présentes dans le sol. Les réponses à ces questions sont le second enjeu de cette étude.

Les hypothèses de recherche issues de ces deux contextes sont donc :

- 1. Le glufosinate peut remplacer le glyphosate pour le désherbage du maïs en monoculture et en séquence avec le soya i.e. la répression des mauvaises herbes et les rendements seront équivalents entre les deux herbicides
- 2. Au bout de trois ans, le remplacement d'un maïs traité au glyphosate par un soya traité avec ce même herbicide n'entraîne pas de différences significatives de répression des mauvaises herbes, dans une séquence d'herbicide RR (Roundup Ready i.e. tolérant au glyphosate) uniquement et dans une séquence avec herbicides RR et LL (Liberty Link i.e. maïs tolérant au glufosinate).
- 3. Le désherbage à dose réduite, comparé au désherbage à dose pleine, n'augmentera pas significativement la banque de semences dans le sol en fin de séquences.

En combinant ces deux problématiques que sont la gestion de la résistance et la réduction des risques liés aux pesticides, cette étude a pour objectif d'évaluer différentes séquences d'herbicides en condition de doses réduites. À la lumière de cette étude, les producteurs seront conseillés sur une stratégie efficace (critères agronomique et économique), plus respectueuse de l'environnement et qui se situe dans une approche durable du point de vue de la résistance des mauvaises herbes dans la culture du maïs et du soya.

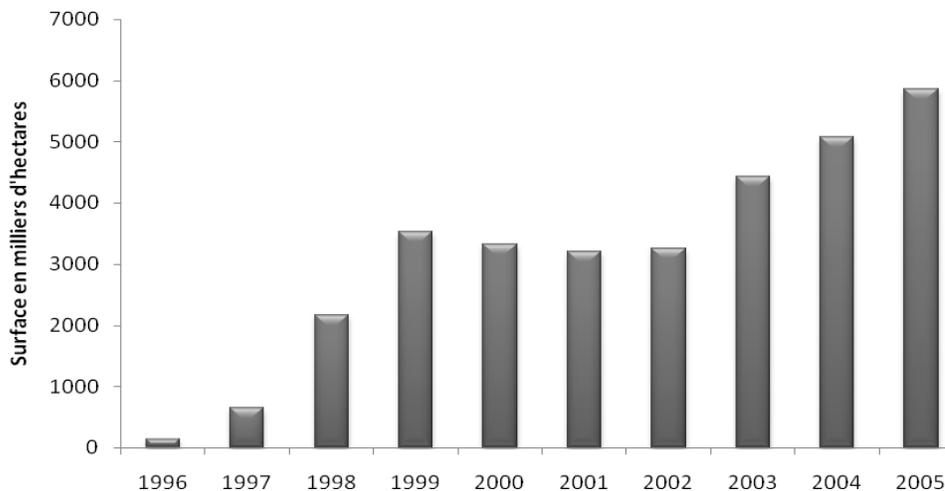
# **1. Revue de littérature**

## **1.1 Le désherbage chimique au moyen d'herbicides non sélectifs dans le maïs et le soya**

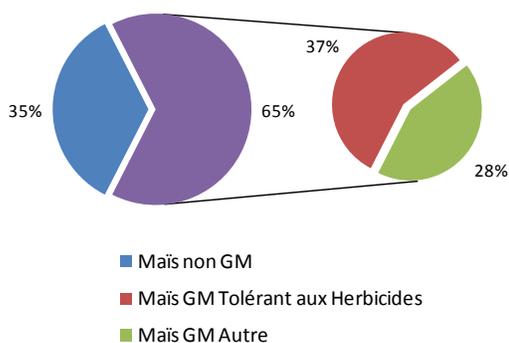
### **1.1.1 Historique, importance et enjeux**

#### **1.1.1.1 Adoption dans le monde, au Canada et au Québec**

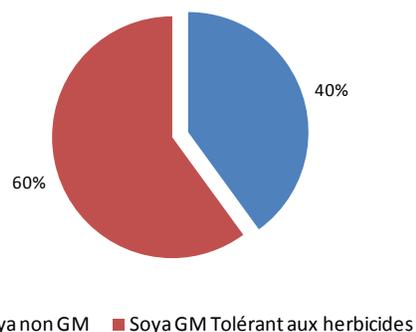
Depuis maintenant plus d'une décennie, l'agriculture moderne subit un profond changement lié à l'apparition des cultures génétiquement modifiées (CGM). Depuis leur introduction en 1996, les superficies de ces cultures n'ont cessé de croître, avec en 2007 près de 120 millions d'hectares cultivés à travers le monde (Clive 2008). La plus grande proportion de ces cultures intègre un gène de tolérance aux herbicides non sélectifs dans les cultures de canola, de coton, de maïs et de soya. En 2007, cette catégorie de cultures génétiquement modifiées représente 70 millions d'hectares à travers le monde (Clive 2008) soit la majorité de ce type de cultures (environ 58%). Cette technologie est considérée par certains comme la plus révolutionnaire (Owen 2008) et la plus rapidement adoptée dans l'histoire de l'agriculture (Dill et coll. 2008). Le Canada est l'un des principaux producteurs de ce type de cultures et les superficies suivent la même croissance que dans le monde. Les surfaces en culture ont évolué rapidement (figure 1.1) durant les dix dernières années avec presque six millions d'hectares cultivés en 2005. Cette même année, les surfaces de maïs génétiquement modifié occupaient 67% des superficies totalesensemencées pour cette culture (figure 1.2). Pour le soya, la proportion est plus faible (figure 1.3), mais correspond quand même à 60% des surfaces (Brookes & Barfoot 2006). Les superficies de cultivars tolérants aux herbicides non sélectifs occupent la majorité des surfaces avec environ 56% dans la totalité du maïs transgénique et 100% des surfaces en soya transgénique (Figures 1.2 et 1.3). La raison principale, d'une proportion si forte dans le soya est que le gène de tolérance aux herbicides non sélectifs est le seul commercialisé à ce jour.



**Figure 1-1** Superficie au Canada des cultures génétiquement modifiées, de 1996 à 2005 en milliers d'hectares (Brookes & Barfoot 2006).



**Figure 1-2** Proportion des surfaces en maïs génétiquement modifié et tolérant aux herbicides en comparaison avec les surfaces de maïs non génétiquement modifiées, au Canada en 2005 (Brookes & Barfoot 2006).



**Figure 1-3** Proportion des surfaces en soya génétiquement modifié tolérant aux herbicides en comparaison avec les surfaces de soya non génétiquement modifié, au Canada en 2005 (Brookes & Barfoot 2006).

Au Québec, on constate la même tendance avec environ 60% des superficies de maïs qui sont génétiquement modifiées (232 000 ha) et 50% des superficies pour la culture du soya, soit 113 000 ha (Institut de la Statistique du Québec 2000). L'adoption de cette technologie

est donc en forte croissance malgré l'opposition de certains groupes de la population et d'organismes de protection de l'environnement non gouvernementaux (Duke 2005).

### **1.1.1.2 Importance et enjeux des cultures tolérantes aux herbicides**

Les raisons qui expliquent un tel engouement pour ce type de cultures sont multiples. La première et la plus importante concerne l'utilisation du pesticide « le plus vendu au monde » à savoir le glyphosate et son application commerciale la plus connue : le Roundup. Cet herbicide de par ses caractéristiques (voir partie 1.1.2) permet depuis plusieurs dizaines d'années un désherbage efficace contre un large spectre de mauvaises herbes, vivaces ou annuelles. Son homologation pour le désherbage en plein des cultures a grandement simplifié la tâche des agriculteurs (Gianessi 2008) et son utilisation fut croissante depuis cette époque.

Dès lors, le marché des herbicides a connu le début d'un profond changement. D'une part, l'utilisation des autres herbicides a été profondément réduite ; on estime cette réduction à 17 millions de kilogrammes aux USA (Gianessi 2005). En 2005, Duke estimait que la concurrence de cet herbicide a été si forte durant les dix années précédentes que le marché des herbicides a perdu de sa valeur, entraînant le retrait accéléré d'herbicides moins rentables que le glyphosate. D'autre part, ce chercheur montre que l'impact se situe également dans le futur. D'une part, les bénéfices réalisables sont faibles dans ce type de marché très concurrentiel. D'autre part, le coût de fabrication et d'homologation d'une matière active augmente année après année. Dans ce contexte, l'auteur conclut que les efforts de commercialisation de nouveaux herbicides s'en trouvent significativement réduits. Ce premier constat démontre non seulement à quel point cet herbicide développe une domination du marché, mais aussi l'impact qui a conduit à réduire la diversité des herbicides. Ce dernier point est essentiel, car dix ans après l'introduction des cultures tolérantes à cet herbicide, certaines mauvaises herbes ont développé de la résistance au glyphosate (voir partie 1.2.2). Dans ce contexte une gestion à long terme du désherbage doit être mise en œuvre. Un des piliers de cette gestion durable doit être la diversité des systèmes culturaux (Sikkema & Soltani 2005) et sa mise en œuvre passe par une (ré-) utilisation des herbicides existants (Duke 2005). En 2008, au Québec un seul herbicide

propose le même type de désherbage non sélectif : le glufosinate et son application commerciale le Liberty. Le gène de tolérance à cet herbicide existe depuis aussi longtemps que celui du glyphosate, mais son utilisation est restée largement inférieure au glyphosate dans le maïs et le soya. Si le coût plus élevé du Liberty est mis en cause, son contrôle moins efficace des mauvaises herbes comparativement au glyphosate est également responsable de son utilisation plus restreinte.

## **1.1.2 Le glyphosate et le glufosinate d'ammonium**

### **1.1.2.1 Mode et spectre d'action**

Le glyphosate et le glufosinate sont deux herbicides non sélectifs, c'est-à-dire qu'ils agissent sur une très large diversité de plantes. Ces deux herbicides agissent par absorption foliaire, les applications doivent se faire sur des mauvaises herbes levées, jeunes, et en pleine croissance. Les levées de mauvaises herbes après l'application ne sont pas éliminées, car ces produits n'ont pas d'activité résiduelle dans le sol.

Le glyphosate [N-(phosphonométhyl) glycine] bloque la synthèse des acides aminés aromatiques, en inhibant la cible 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSP Synthase). Les acides aminés aromatiques sont essentiels à la croissance des plantes et à la production de protéines. C'est le seul herbicide qui utilise cette cible (Duke & Powles 2008a). Sa mobilité dans la plante est systémique, c'est-à-dire qu'à partir du point d'absorption par le feuillage l'herbicide s'achemine dans la plante jusqu'aux puits métaboliques (méristèmes, racines, rhizomes, etc.). Les symptômes apparaissent d'abord sur le feuillage (2 à 4 jours) qui commence par jaunir (les jeunes feuilles en premier), puis il y a nécrose des tissus foliaires et la plante meurt habituellement dans les 10 à 14 jours qui suivent le traitement.

Le glufosinate ammonium [DL-homoalanin-4-yl-(méthyl) phosphinacide], par sa partie active le L-Glufosinate, bloque l'activité de l'enzyme glutamine synthétase, entraînant une accumulation toxique d'ammoniac dans la plante et une réduction considérable de la photosynthèse (Ruhland et coll. 2004). C'est un herbicide peu mobile dans la plante (herbicide de contact), qui agit relativement rapidement. Il possède également une faible

activité systémique, mais la matière active n'est pas accumulée dans les racines. Des symptômes de chlorose apparaissent généralement au bout de 3 à 5 jours, puis une nécrose au bout d'une à deux semaines suivis de la mort progressive de la plante.

La différence de mode d'action des herbicides représente la clé d'une gestion préventive d'apparition de résistance (Tardif 2005). Toutefois, le glufosinate ne bénéficie pas de la même souplesse d'utilisation que le glyphosate. Son action, majoritairement par contact, se retrouve réduite dans plusieurs cas. D'une part, un faible niveau d'humidité relative de l'air entraîne une diminution d'efficacité chez certaines espèces (ex. *Setaria viridis* L. Beauv) et des températures trop basses peuvent entraîner un retard de phytotoxicité (Anderson et coll. 1993b). D'autre part, le moment d'application en fin de la photopériode procurerait de meilleurs résultats sur la répression de la sétaire verte (Anderson et coll. 1993a). En 2000, Hamill et coll. conseillent de réaliser des applications séquentielles de glufosinate ou des mélanges avec un herbicide résiduel pour augmenter les rendements du maïs (Hamill et coll. 2000). De plus même dans de bonnes conditions l'efficacité de cet herbicide semble irrégulière sur le chénopode (*Chenopodium album* L.) (Wax et coll. 1997) due à l'absorption et à la translocation moins forte de l'herbicide chez cette espèce (Steckel, Hart et coll. 1997). D'un autre côté, le glyphosate est un herbicide extrêmement efficace sur un très large spectre de mauvaises herbes et dans des conditions d'applications très diverses (Sikkema & Soltani 2005). Son utilisation assure une grande flexibilité pour les producteurs avec des rendements préservés grâce à une seule application.

L'étude du mode et du spectre d'action de ces deux herbicides nous apporte un premier élément de réponse concernant la préférence des producteurs pour le glyphosate, notamment pour sa régularité et sa souplesse d'utilisation.

### **1.1.2.2 Toxicité environnementale**

L'utilisation des herbicides non sélectifs a permis de réduire considérablement l'impact environnemental des herbicides sur l'environnement par opposition aux herbicides qu'ils remplacent (Williams et coll. 2000). Le glyphosate est rapidement et fermement adsorbé par les particules de sol, sa demi-vie est d'environ 17 jours dans le sol (Claudio 2005). En

conséquence même si sa détection est possible dans les eaux de surfaces, sa dégradation rapide l'empêche de polluer les nappes phréatiques (Borggaard & Gimsing 2008; Klier et coll. 2008). En 2007, Cerdeira et coll. ont publié la synthèse la plus exhaustive sur les différents impacts du glyphosate, concluant au faible impact de cet herbicide sur l'environnement (Cerdeira et coll. 2007). Le glufosinate est également un herbicide relativement sécuritaire (Ebert et coll. 1990). Sa durée de vie varie de 4 à 34 jours avec une moyenne plus proche de 6,4 jours (Claudio 2005). Les risques de pollution des nappes phréatiques par le glufosinate sont également considérés comme faibles même si une détection dans les eaux de surfaces reste possible (Laitinen et coll. 2006). Les deux herbicides ont donc une toxicité faible. Ainsi, l'utilisation du glufosinate en remplacement du glyphosate ne représente pas un retour à l'utilisation de pesticides plus toxiques, sauf s'il est appliqué en mélange avec un autre herbicide.

### **1.1.2.3 Les cultivars résistants aux herbicides non sélectifs**

Grâce à la biotechnologie moderne, les premières cultures résistantes aux herbicides ont été disponibles en 1992. Depuis leur avènement au Québec, les cultivars résistants aux herbicides connaissent un succès croissant auprès des producteurs de canola, de maïs-grain et de soya. Jusqu'en 2005 au Canada, il existait des hybrides de maïs tolérants soit au glyphosate (Roundup Ready®, RR), soit au glufosinate (Liberty link®, LL) et des cultivars de soya seulement résistants au glyphosate (Roundup Ready®, RR). Pour le glufosinate, le gène de tolérance introduit est phosphinothricine-N-acetyltransférase (PAT) tiré à l'origine d'une bactérie répandue dans le sol, *Streptomyces viridochromogenes*, et qui code la production de l'enzyme phosphinothricine acétyltransférase (PAT) (Beriault et coll. 1999). Pour le glyphosate, l'introduction d'un gène codant pour la protéine CP4 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (CP4 EPSPS) assure à la culture la tolérance à l'herbicide (Duke & Powles 2008a). De plus, selon l'hybride de maïs commercialisé, un autre gène est introduit : le GOX, cloné à partir de la souche LBAA de la bactérie *Achromobacter sp.* L'enzyme GOX accélère la dégradation normale du glyphosate en acide aminométhylphosphonique (AMPA) et en glyoxylate, ce qui assure une tolérance supplémentaire du maïs modifié aux applications de glyphosate (Anonyme 2009c).

Depuis 2006 de nouveaux hybrides de maïs tolérant à la fois le glyphosate et le glufosinate ont été commercialisés au Québec (Malenfant & Thérien 2005). Cette nouvelle technologie a apporté aux producteurs une plus grande flexibilité dans leur désherbage, car le choix de l'herbicide glyphosate ou glufosinate peut se faire au moment du traitement et non plus au moment de l'achat de la semence. Ceci représente une excellente opportunité pour améliorer la gestion de la résistance au glyphosate, car l'utilisation alternée des deux herbicides devient plus flexible.

### **1.1.3 Stratégies de désherbage associées aux herbicides non sélectifs**

#### **1.1.3.1 Le désherbage en postlevée**

L'utilisation des herbicides non sélectifs pour le désherbage du maïs et du soya a largement contribué à l'augmentation de la stratégie dite de postlevée. Cette stratégie permet, dans le cas du glyphosate et du glufosinate, de contrôler l'ensemble des mauvaises herbes présentes au moment du traitement. Compte tenu de l'effet non résiduel de ces herbicides, les plantules levées après le traitement ne sont pas réprimées. Ce constat influence donc les producteurs à effectuer leur traitement le plus tard possible pour contrôler le maximum de mauvaises herbes en une seule application. Cependant, les producteurs doivent aussi tenir compte des fortes densités de mauvaises herbes qui peuvent être à l'origine de pertes de rendement (Dalley et coll. 2004). On parle alors de compétition hâtive des mauvaises herbes pendant la période critique de désherbage, et dans ce cas un traitement trop tardif entraîne des pertes de rendement puisque le maïs ne rattrape pas complètement le retard de croissance subi durant la période critique (Anonyme 2008).

Nous avons vu que le mode d'action du glyphosate, et dans une moindre mesure du glufosinate, permet une grande flexibilité quant au stade atteint par les adventices au moment du traitement. Les fabricants préconisent une fenêtre d'application particulière par rapport au stade du maïs et du soya. Pour le glyphosate, l'application devrait se faire avant le stade 8 feuilles du maïs et entre la première feuille trifoliolée et la fin de la floraison pour le soya (Anonyme 2009b). Pour le glufosinate, le stade de l'application se situe entre 1 et 8 feuilles du maïs, mais le fabricant précise qu'un traitement entre 3 et 5 feuilles permettra de

meilleurs rendements (Anonyme 2009a). Ces fenêtres d'applications sont relativement larges et plusieurs études montrent qu'une baisse des rendements peut être observée suivant le stade des mauvaises herbes au moment de l'application d'herbicide. En 2004, Dalley et coll. démontrent qu'une application de glyphosate sur des adventices dont la taille est supérieure à 15 cm dans le maïs et 23 cm dans le soya entraîne des pertes de rendement dans une parcelle avec de fortes densités (Dalley et coll. 2004). En 2003, Gower et al. estiment que le meilleur moment pour appliquer du glyphosate dans le maïs se situe avant que les mauvaises herbes atteignent 10cm de hauteur, que le maïs soit au stade maximum de 4 feuilles et enfin que le traitement soit effectué au maximum 23 jours après le semis (Gower et coll. 2003). Malgré toutes ces études et recommandations, on constate que dans les parcelles traitées au glyphosate un décalage de la flore adventice est possible notamment un plus grand nombre d'espèces à levées tardives (Giguère 2000). Pour le glufosinate, Hamill et coll. en 2000, préconisent une application au stade du maïs le plus avancé possible. Toutefois, ils recommandent aussi une application séquentielle ou en mélange du glufosinate pour de meilleurs rendements.

### **1.1.3.2 Applications séquentielles**

L'application séquentielle de glyphosate a pour but un contrôle optimal de la période critique de désherbage. Dans ce type de gestion des mauvaises herbes, les deux herbicides non sélectifs présentent des différences. En 2004, Chouinard a testé les deux herbicides dans des conditions séquentielles et en a tiré les conclusions suivantes. Pour le glufosinate, dans le cas d'infestations de graminées, les applications séquentielles sont préférables à l'application unique tel que le suggèrent Hamill et coll. en 2000. Pour le glyphosate, dans le maïs et le soya, les applications séquentielles ne procurent pas un meilleur contrôle des mauvaises herbes (Chouinard 2004), ni de meilleurs rendements (Dalley et coll. 2004). Toutefois, Gower et coll. en 2003 ont remarqué que les réinfestations de mauvaises herbes étaient bien réprimées grâce à une deuxième application de glyphosate dans 23 sites sur les 35 de leur étude, avec également une augmentation des rendements (Gower et coll. 2003). Toutefois, les producteurs qui utilisent des cultivars tolérants aux herbicides non sélectifs, font ce choix pour « *lever les contraintes liées aux régies d'application des herbicides, et à diminuer le coût global associé à ces intrants de production. Les producteurs de soya RR,*

*notamment, affirmaient utiliser ces semences pour diminuer les dépenses en herbicides »* (Michaud et coll. 2005). Or les applications séquentielles nécessitent deux passages au minimum et représentent une augmentation du coût (incluant le carburant et l'utilisation du tracteur) et du temps nécessaire au désherbage. Ces constats nous permettent, une nouvelle fois, de mieux comprendre le succès de l'application unique de glyphosate.

### **1.1.3.3 Applications avec un herbicide résiduel**

Les applications d'herbicides non sélectifs en mélange avec des herbicides résiduels, permettent de prolonger la période de répression des mauvaises herbes. Néanmoins, cette pratique provoque dans la majorité des cas une hausse significative de l'impact environnemental comparativement à une application seule de glyphosate et du glufosinate (Devos et coll. 2008). Pour le glufosinate, l'ajout en mélange d'un herbicide résiduel permet de mieux réprimer les mauvaises herbes, mais aussi d'augmenter les rendements (Chouinard 2004; Hamill et coll. 2000). Pour le glyphosate, l'ajout d'un herbicide en prélevée de la culture et des mauvaises herbes, permet de décaler plus tardivement l'application principale et ainsi de réduire le nombre de mauvaises herbes qui émergent après l'application d'herbicide (Parker et coll. 2006). Cependant comme pour les applications séquentielles, l'utilisation d'herbicides résiduels engendre une augmentation non négligeable des coûts. Si ce type de désherbage semble utile dans le cas du glufosinate, il semble uniquement apporter un contrôle supplémentaire, ne modifiant pas les rendements de l'année en cours, dans le cas du glyphosate. On constate donc qu'une deuxième application d'herbicide est peu ou pas nécessaire lorsque l'application de glyphosate se fait dans de bonnes conditions, ce qui n'est pas le cas du glufosinate

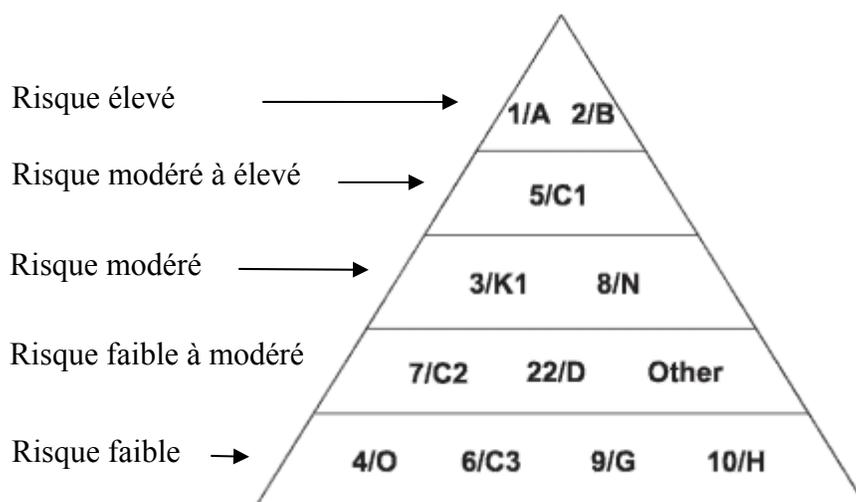
Si l'ensemble des faits observés jusqu'à présent montrent et expliquent le succès du glyphosate dans les cultures tolérantes aux herbicides non sélectifs, la tendance pourrait être modifiée dans le futur. En opposition avec un système cultural diversifié, l'utilisation constante du glyphosate dans le maïs et le soya a atteint ses limites, à cause notamment de l'apparition des mauvaises herbes résistantes à cet herbicide.

## 1.2 Problématiques actuelles et changements futurs

### 1.2.1 La résistance des mauvaises herbes au glyphosate

#### 1.2.1.1 État des lieux de la résistance

Au moment de son introduction, les scientifiques ont vu dans le glyphosate une solution qui permettrait de ralentir l'apparition de mauvaises herbes résistantes, comme c'était déjà le cas pour plusieurs groupes d'herbicides. De plus, son utilisation antérieure pour des traitements localisés n'avait, à ce moment, engendré aucune résistance chez les mauvaises herbes (Bradshaw et coll. 1997). En 2006, Beckie propose une pyramide des risques d'apparition de résistance en fonction des modes et sites d'actions des groupes d'herbicides (Figure 1-4 traduction libre), qui confirme le faible risque d'apparition de résistance du glyphosate et du glufosinate comparativement aux autres herbicides.



**Figure 1-4** Classification des modes et sites d'actions des herbicides en fonction du risque de sélection de résistance (Beckie 2006).

(Un risque élevé indique une apparition potentielle de résistance après < 10 applications ; Modéré = 11 à 20 ; Faible > à 20 applications. Mode et site d'action: 1/A, inhibiteurs d'ACCCase; 2/B, inhibiteurs d'ALS; 3/K1, inhibiteurs de l'assemblage des microtubules (e.g., dinitroanilines); 4/O, auxines synthétiques; 5/C1 (e.g., triazines), 6/C3 (e.g., nitriles), 7/C2 (e.g., urée)– inhibiteurs de la photosynthèse II; 8/N, inhibiteurs de la synthèse des lipides (thiocarbamates); **9/G, inhibiteurs de l'enolpyruvyl-shikimate-3-phosphate synthase**

(EPSPS) (glyphosate); 10/H, inhibiteurs de glutamine synthase (glufosinate); 22/D, photosynthèse I (bipyridyliums); "other," informations insuffisantes pour tous les autres sites d'action.

Cependant, nous avons mentionné que le glyphosate avait entraîné, d'une part une diminution de la diversité d'herbicides, et d'autre part un abandon progressif de la notion de gestion de la résistance (Young 2006). Ceci était d'autant plus probable que la gestion de la résistance est rarement faite de façon préventive dans un système de culture intensif (Beckie 2006) comme celui utilisant le glyphosate. Hall (2005) va même jusqu'à affirmer que c'est la nature humaine qui ne peut s'empêcher d'utiliser une formule qui fonctionne selon ses propres attentes (Hall 2005).

Avant même l'apparition de résistance, la composition et l'abondance des populations évoluent en réponse à une nouvelle gestion des mauvaises herbes (Culpepper 2006). C'est le cas dans les systèmes culturaux utilisant le glyphosate (Owen 2008), avec notamment une augmentation de l'abondance de chénopode blanc, de renouée liseron (*Polygonum convolvulus* L.) ou encore de comuline (*Commelina cumminus* L.) (Owen & Zelaya 2005). Dans un second temps, l'apparition de résistance au glyphosate arrive, liée essentiellement à une pression de sélection sur le site d'action de l'herbicide (Entz 2005). La plante subit alors plusieurs altérations biochimiques et physiologiques, entraînant une diminution de l'accumulation de matière active dans le site d'action initial (Tardif 2005). Le portrait mondial des espèces résistantes au glyphosate (tableau 1.1) fait état en 2005 de huit espèces entraînant des pertes économiques dans les cultures.

**Tableau 1-1** Chronologie des mauvaises herbes résistantes au glyphosate (Tardif 2005)

<i>Année</i>	<i>Espèces</i>	<i>Pays (premier constat)</i>
1996	<i>Lolium rigidum</i>	Australie, USA, Afrique du Sud
1997	<i>Eleusine indica</i>	Malaisie
2000	<i>Conyza canadensis</i>	USA (11 états)
2001	<i>Lolium multiflorum</i>	Chili, Brésil, Oregon
2003	<i>Plantago lanceolata</i>	Afrique du Sud
2003	<i>Conyza bonariensis</i>	Afrique du Sud
2004	<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	USA (Missouri, Arkansas)
2005	<i>Amaranthus Palmeri</i>	USA (Géorgie)

Le problème est d'autant plus grave lorsqu'il touche des espèces ayant une forte production de graines (Neve 2008). En 2008, Westhoven et coll. rapportent un manque d'efficacité du glyphosate sur le chénopode blanc, obligeant les producteurs à utiliser un herbicide résiduel de type 2,4-D avant le glyphosate (Westhoven et coll. 2008).

Par la suite, la propagation de la résistance se poursuit par des moyens classiques, à savoir : les conditions naturelles (eau, vents, faune), la machinerie et dans une moindre mesure les lots de semences (Entz 2005). De plus, une augmentation du nombre d'espèces est facilement prévisible vu le succès que rencontre ce type de culture (Puricelli & Tiesca 2005; Powles 2008). À la vue de ce constat très préoccupant, la conduite d'une stratégie préventive semble fortement requise, si les agriculteurs veulent continuer à profiter des bénéfices de cet herbicide (Duke & Powles 2008b). C'est d'autant plus vrai, qu'au Québec, aucune mauvaise herbe n'a pour l'instant été signalée résistante au glyphosate (Malenfant 2006).

#### **1.2.1.2 Prévention de la résistance**

*« Les cultures résistantes aux herbicides doivent jouer un rôle dans la gestion des résistances multiples et non devenir une base dominante de la gestion des mauvaises herbes »* (Beckie 2006). Cette citation résume bien le changement de stratégie que devraient adopter les producteurs. La rotation d'herbicides avec des modes d'action différents est la recommandation la plus décrite par les malherbologistes. Pour cela plusieurs méthodes sont proposées : la rotation de cultures (entraînant si possible un changement d'herbicide), l'utilisation de mélanges d'herbicides ou encore l'alternance de cultures tolérantes aux herbicides non sélectifs et de cultures conventionnelles (entraînant aussi un changement d'herbicide).

Toutefois, la simplicité et la flexibilité du traitement au glyphosate sont pour les producteurs qui l'utilisent (et qui n'ont toujours pas de résistance) un atout prioritaire. Dans ce contexte, une solution équivalente en termes de coût et de simplicité doit être trouvée. Cette solution doit aussi anticiper l'apparition de mauvaises herbes résistantes au glyphosate qui devront être contrôlées (Shaner 2000). Le glufosinate malgré ses défauts

serait donc la solution la plus simple à mettre en œuvre sans bouleverser les pratiques actuelles des producteurs. Jusqu'en 2009, aucun cas de résistance au glufosinate n'est apparu ni au Canada, ni dans le monde (Beckie 2007). Il pourrait donc remplacer le glyphosate plus fréquemment, notamment grâce aux cultivars qui portent les gènes de résistances des deux herbicides simultanément (Green et coll. 2008).

Précédemment, nous avons vu que certaines études montrent des différences de répression entre ces deux herbicides. L'enjeu est donc de savoir si une alternance glyphosate-glufosinate est envisageable une, deux ou trois années sur trois (court-moyen terme) dans une séquence combinant les deux herbicides. Cette solution devra procurer un contrôle des mauvaises herbes et des rendements équivalents à une utilisation répétée de glyphosate. La comparaison des moyennes des séquences utilisant les deux herbicides avec une séquence n'utilisant que le glyphosate semble donc appropriée pour vérifier cette possibilité. C'est le premier enjeu de cette étude.

## 1.2.2 Impact environnemental et sanitaire des herbicides

### 1.2.2.1 Le programme de réduction des risques liés aux pesticides

L'utilisation des pesticides chimiques pour le traitement des cultures est un sujet de préoccupation important pour le public et les gouvernements. L'introduction des cultures tolérantes aux herbicides non sélectifs a permis de réduire significativement l'impact des herbicides sur l'environnement par rapport aux herbicides utilisés précédemment (Devos et coll. 2008). Nous avons vu que le profil toxicologique du glyphosate et du glufosinate en est la raison majeure. Toutefois, cette avancée n'est pas synonyme de suppression de tous risques liés aux herbicides et des progrès sont toujours à faire dans ce domaine. Par exemple, il est toujours possible de retrouver du glyphosate dans les couches inférieures du sol si une forte pluie suit une application sur sol humide (Vereecken 2005). Au Québec le glyphosate est de plus en plus détecté dans les cours d'eau. Des analyses ont permis de détecter l'herbicide tout près du seuil de détection (0,1 µg/L) dans 37,8 % des échantillons de la rivière Chibouet en 2001 (seule rivière où ce paramètre a été mesuré en 2001) (Giroux 2002).

Le Centre pour la lutte antiparasitaire (CLA) au Canada a donc mis en place un programme de réduction des risques liés aux pesticides (Anonyme 2009d). « *L'objectif est de créer des stratégies antiparasitaires réalisables, avantageuses sur le plan tant économique qu'environnemental et ayant le plus de potentiel possible quant à leur mise en œuvre par les producteurs.* » (Anonyme 2009a). L'utilisation de doses réduites d'herbicides dans une rotation de maïs-soya est donc un volet prioritaire de cette étude. Or ce type de stratégie est perçu différemment suivant que l'on se place du côté du producteur, du fabricant, de l'agronome, du chercheur, ou encore de l'assureur des récoltes.

### 1.2.2.2 La réduction des doses d'herbicide

Avant toute chose, un constat s'impose : l'utilisation de doses réduites d'herbicide est une pratique relativement bien développée au Québec. En 2007, le portrait agroenvironnemental des fermes de la province montre que 19% des exploitations qui interviennent avec un traitement herbicide le font avec des doses réduites (tout herbicide confondu) (Drolet & Pigeon 2009). Ce pourcentage place cette stratégie en première place de la lutte intégrée sur les 4264 répondants de l'étude. Il s'agit d'un constat surprenant quand on sait que le fabricant des herbicides et certains agronomes préconisent d'appliquer « *la dose pleine homologuée* » (Anonyme 2009b) afin de garantir l'efficacité du produit telle qu'elle a été décrite lors de l'homologation de l'herbicide. De plus, l'emploi de la dose recommandée prévoit une efficacité réelle dans une large diversité de situations (flore, conditions climatiques) et dans le respect des attentes des producteurs (Doyle & Stypa 2004). Ce n'est pas le cas des doses inférieures à l'étiquetage du produit et de ce fait, leur utilisation est considérée comme hors du cadre législatif et commercial du fabricant. Deux conséquences directes s'en suivent : premièrement, les fabricants d'herbicides n'assument aucune responsabilité en cas d'échec dû à une utilisation non conforme du produit, et deuxièmement, la Financière agricole du Québec n'indemnise pas les pertes attribuables à cette pratique (Thibault 2006). Malgré tout, l'utilisation de doses réduites permettrait un meilleur retour financier pour les producteurs (Thibault 2006).

Plusieurs études ont été menées pour mesurer l'impact de l'utilisation de doses réduites dans un système utilisant le glyphosate. Dans ce type de stratégie, le but du désherbage n'est pas de garantir une parcelle sans aucune mauvaise herbe, mais plutôt de garder les communautés adventices à un niveau acceptable (sans pertes de rendement significative) grâce à un suivi de recommandations (Boström & Fogelfors 2002). En présence du chénopode blanc, on constate que les rendements de maïs ne diminuent que si le glyphosate est appliqué en dessous de la demi-dose et un désherbage à demi et trois quarts dose semble envisageable sans perte de rendement ni augmentation de la banque de graines (Sikkema et coll. 2004). En présence de pied-de-coq (*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.), les mêmes résultats sont valables pour le glyphosate à condition de décaler l'application à 6 feuilles du maïs pour gérer au mieux les levées tardives de cette espèce de graminée (Sikkema et coll.

2005). Pour les doses réduites de glufosinate, les études sont moins nombreuses, mais Chouinard (2004) conclut que l'utilisation de doses réduites de cet herbicide n'est pas recommandée en application unique ou séquentielle, car les répressions sont significativement inférieures à la dose pleine. Plus globalement, les études relatives aux doses réduites d'herbicide ne recommandent pas leur utilisation lorsque la pression des mauvaises herbes est élevée (Blackshaw et coll. 2006).

Reste un dernier point sur lequel les scientifiques ne sont pas d'accord : la relation entre la résistance et les doses réduites d'herbicide. Il s'agit d'un sujet complexe et d'autres études relatives à ce sujet sont encore à réaliser pour éclaircir ce problème.

Ainsi, l'impact d'une utilisation répétée de doses réduites représente le second enjeu de cette étude. Leur utilisation permettrait de réduire l'impact environnemental du désherbage dans le maïs et le soya. Toutefois, il convient de vérifier si ce type de pratique ne met pas en péril les rendements de l'année en cours ou n'augmente pas la banque de graines de mauvaises herbes dans le sol, entraînant une augmentation de la densité des mauvaises herbes dans les années subséquentes

### **1.3 La banque de graines de mauvaises herbes dans le sol**

Dans les agrosystèmes, les banques de graines permettent le maintien des populations de mauvaises herbes, en particulier les espèces annuelles. Étudier une banque de graines permet d'évaluer la diversité des espèces présentes durant la saison de croissance et celle des années antérieures, selon la dormance potentielle des graines des différences espèces. Cela permet aussi d'évaluer quantitativement l'apport potentiel de semences viables et la persistance de certaines espèces. Par déduction, l'étude des banques de graines permet donc aussi d'avoir une idée théorique des levées potentielles de mauvaises herbes. Certains chercheurs ont pu établir des corrélations entre les densités de mauvaises herbes levées et leur stock semencier (Rahman et coll. 2006), mais d'autres études montrent toutefois qu'il est difficile de prédire les futures levées (Cardina & Sparrow 1996). À ce jour l'utilisation de modèles de prévision des levées de mauvaises herbes est encore très limitée (Grundy 2003), car certains paramètres comme la dormance ou la variabilité spatiale des espèces sont difficiles à évaluer précisément. L'étude de la banque de graines est essentielle dans le cadre de cette étude. Elle permet de quantifier les changements floristiques engendrés par l'utilisation de doses réduites d'herbicides en comparaison aux doses homologués. Le choix de la méthode pour mesurer ces changements doit donc être déterminé avec rigueur.

Les banques de graines sont évaluées de diverses façons qui sont généralement fastidieuses et longues. Deux groupes de méthodes sont utilisés habituellement pour estimer la composition des graines de mauvaises herbes d'un sol : la méthode de séparation du sol et des semences et la méthode de germination et d'émergence des semences (Heerdt et coll. 1996). Dans les deux cas, les méthodes présentent des avantages et des inconvénients et le choix de leur utilisation se fait en fonction de plusieurs paramètres, comme le nombre d'échantillons à traiter, les espèces présentes, le type de sol et enfin le matériel et le temps disponible. Parallèlement, une méthode mixte a été développée en écologie en 1996 (Heerdt et coll. 1996) et son utilisation en malherbologie semblerait prometteuse, notamment grâce à la précision et au gain de temps qu'elle procure.

### 1.3.1 La méthode de séparation des semences et du sol

Cette méthode a pour principal intérêt d'évaluer à la fois la banque viable et non viable des graines de mauvaises herbes. Cette méthode se déroule en deux étapes : la séparation physique des graines d'une part et le comptage manuel des graines retrouvées d'autre part. Pour la première étape, plusieurs techniques peuvent être utilisées :

**- Par flottaison ou séparation par densité :** cette méthode permet une séparation directe des graines grâce au mécanisme de différences de densité entre les graines et la solution préparée (Smutny & Kren 2002). Une solution à base d'hexamétaphosphate de sodium ( $\text{Na}_6\text{O}_{18}\text{P}_6$ ) ajouté à du bicarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ) est à la base des premiers essais concluants effectué par Malone (1967). En 1993, Buhler et Maxwell ont modifié cette méthode en ajoutant dans un premier temps du sulfate de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ), avant de le remplacer par du carbonate de potassium ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) notamment pour améliorer la cueillette des graines d'abutilon (*Abutilon theophrasti Medic.*). L'inconvénient de cette méthode est la diminution de la viabilité des graines après passage dans la ou les solutions aqueuses (Buhler & Maxwell 1993). Une méthode par flottaison dans l'air a été également testée en 1980 par Standifer grâce à une soufflerie. Les résultats restaient imprécis et trop laborieux (Standifer 1980) notamment pour les graines qui avaient des dimensions et des poids similaires.

**- Par élutriation ou lavage :** Cette méthode consiste à faire passer des particules de sol au travers de tamis ou de filtres grâce à la force d'un jet d'eau (Smutny & Kren 2002). Le but est de réduire la quantité de sol dans laquelle il faudra prélever manuellement les graines. De plus en combinant plusieurs mailles de tamis ou de filtre, on peut récupérer plus facilement les graines les plus grosses. Certains chercheurs ont même créé des élutriateurs capables de laver par filtration un échantillon de sol dans un premier temps (Kovach et coll. 1988) et plusieurs échantillons de sols par la suite (Wiles et coll. 1996), utilisés notamment pour le traitement de 4000 échantillons et plus. Thorsen et Crabtree (1977) proposaient également d'ajouter un agent de dislocation du sol ( $\text{Na}_6\text{O}_{18}\text{P}_6$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ou  $\text{MgSO}_4$ ) à leur système de lavage par rotation dans un tambour. En 1989 Gross et Renner ont utilisé un système hydropneumatique qui combinait l'aspiration des graines par l'air,

leur lavage par l'eau et leur sélection grâce à trois tamis de récupération. La texture du sol peut avoir un impact significatif sur l'efficacité de la méthode.

**- Par la méthode dite du «sac à linge» :** L'échantillon de sol est placé dans un sac en nylon perforé et le lavage s'effectue ensuite comme du linge dans une machine à laver (Fay & Olson 1978). La texture du sol peut, ici aussi, avoir un impact significatif sur l'efficacité de la méthode. Cette technique ressemble fortement aux systèmes d'élutriation présentés plus haut, mais demande moins de matériel.

**- Par tamisage :** Cette technique est rarement utilisée seule dans la littérature et représente le plus souvent une étape du processus global lié à une autre méthode. On parlera alors de méthode mixte (voir le paragraphe plus bas à ce sujet). Néanmoins, le tamisage peut être utilisé comme une technique seule lorsqu'on recherche des graines relativement grosses (Mesgaran et coll. 2007).

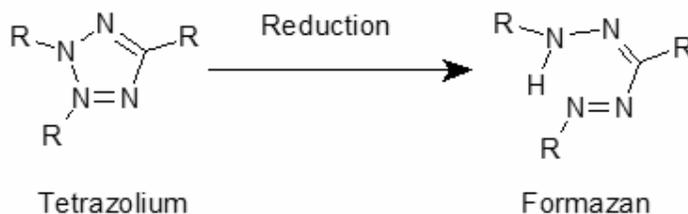
Dans la deuxième étape, les résidus obtenus sont ensuite triés et identifiés grâce à une loupe binoculaire pour identifier et dénombrer les différentes espèces de mauvaises herbes. Cette étape demande beaucoup de précautions, (Ishikawa-Goto & Tsuyuzaki 2004) mais aussi beaucoup de temps. Une majorité d'auteurs s'accordent pour décrire cette tâche comme longue et laborieuse. La raison principale est la similarité entre les graines les plus petites et la difficulté à les identifier sans erreur.

Après cette deuxième étape, on dispose donc d'une banque de graines totale et il faut tester la viabilité des graines pour connaître la proportion potentiellement capable d'émerger. Là encore, plusieurs techniques sont possibles :

**- La vérification par coupe ou broyage :** Cette méthode présente l'avantage d'être directe et est considérée comme la plus rapide en ce qui concerne à la détection de graines viables (Sawma & Mohler 2002). Il s'agit simplement de vérifier visuellement l'état de l'embryon de la graine en considérant comme viables les embryons encore blancs et en bon état (Heerd et coll. 1996).

**- Le test au sel de tétrazolium :** Le triphényl 2, 3, 5 chlorure de tétrazolium (C<sub>19</sub>H<sub>15</sub>ClN<sub>4</sub>) est un indicateur qui va permettre la coloration des tissus vivants en rouge.

Au départ il s'agit d'un sel incolore et soluble dans l'eau. Au contact des tissus vivants, le sel de tétrazolium devient par réduction du formazan (Figure 1-5).



**Figure 1-5** Schéma de la réduction du sel de tétrazolium

La déshydrogénase présente dans les tissus vivants et non dans les tissus morts représente l'enzyme réductrice qui permet la formation du formazan, agent insoluble, qui restera prisonnier des tissus vivants. L'activité d'oxydoréduction sera alors visible grâce à la coloration rouge (Ellis et coll. 1985). Cette méthode est habituellement choisie pour la précision qu'elle procure. En 2002, Sawma et Mohler ont mené une étude comparative entre ces deux techniques et ont conclu que même si le sel de tétrazolium procure une efficacité légèrement supérieure lors des mesures de viabilité, il peut être également source d'erreur. Par exemple, la coloration en rouge d'une graine peut être due uniquement à la présence d'activité microbienne. De plus, les graines de petite taille sont très difficiles à couper en deux et la visibilité de leur embryon est parfois très difficile. Une vérification au microscope peut être faite, mais augmente grandement le temps de la manipulation. Les auteurs de cette étude recommandent l'utilisation du test par coupe dans le cas des études avec de grandes quantités de semences et où une marge d'erreur assez grande est tolérée. La méthode utilisant le sel de tétrazolium est recommandée dans les expériences où l'on recherche une marge d'erreur basse et que la viabilité des graines est une variable majeure.

### 1.3.2 La méthode de germination et d'émergence des semences

Cette méthode a été la première utilisée pour quantifier des banques de graines (Putensen 1882). L'approche est totalement différente puisque l'identification et le comptage se font grâce aux levées de mauvaises herbes (Gross 1990). Le but étant de

« vider » au maximum une banque de semence en effectuant plusieurs cycles de germinations et d'émergences. Seule la banque viable et non dormante sera énumérée grâce à cette méthode et on devine donc que le défi est d'obtenir le maximum de germinations et d'émergences de la banque de graines prélevée.

Aux premiers essais de la méthode par les chercheurs, les échantillons étaient mis en germination directement après le prélèvement au champ. Mis en place en serre, ce dispositif nécessite de mettre les échantillons dans des bacs peu profonds (5-10cm) et de donner les conditions nécessaires à la germination (lumière naturelle et artificielle (en complément) eau en abondance et chaleur). Ce dispositif brut montra très rapidement ses limites, car les conditions de levées diffèrent d'une espèce à l'autre (Leblanc et coll. 2004). La méthode donnait alors une estimation non exhaustive de la flore présente (Thompson & Grime 1979). Une variation de la température pendant la période de germination (Thompson & Grime 1983) et, par la suite, la mise au froid des graines entre le prélèvement et la mise en germination ont permis d'améliorer la technique. En 1990, Gross a démontré l'importance de cette stratification par le froid permettant d'obtenir un plus grand taux de germination et un plus grand nombre d'espèces (Gross 1990). L'avantage principal de cette méthode est de quantifier de façon précise et sans erreur les espèces qui émergent. L'inconvénient principal reste le non-dénombrement de graines viables qui n'ont pas émergé pour diverses raisons (profondeur dans l'échantillon de sol, dormance, etc.). D'autres inconvénients assez importants sont à noter. Notamment l'utilisation de grandes surfaces en serre durant plusieurs mois. Roberts (1981) suggère une période moyenne de deux années pour une quantification efficace.

### **1.3.3 La méthode mixte**

Heerdt et coll. (1996) ont réussi à obtenir une quantification à la fois efficace et rapide avec une méthode de tamisage suivi d'une période de mise en germination. Leur méthode consiste dans un premier temps à faire une concentration du sol par tamisage (de manière à réduire la quantité de sol) et dans un deuxième temps une mise en germination en serre de l'échantillon réduit, de telle sorte que ce dernier soit étalé sur une mince couche de terre favorisant ainsi la germination du maximum de graines. Ce dispositif permet d'obtenir des

taux de germination compris entre 81 et 100% des semences viables présentes dans leurs échantillons (Heerdt et coll., 1996).

La réduction du sol se fait en combinant la technique de tamisage avec la technique d'élutriation. L'échantillon est placé sur une succession de tamis et la séparation du sol se produit grâce à un jet d'eau relativement puissant. Cette manipulation permet d'une part de récupérer les graines les plus grosses sur les tamis supérieurs, mais aussi de récupérer la partie des graines restantes sur le tamis le plus bas et donc le plus fin. Cette dernière partie représente donc un échantillon de sol concentré. Aucune solution visant à défloculer les particules du sol n'est utilisée et la viabilité des graines est préservée. Par la suite cet échantillon concentré est mis en germination sur un terreau stérilisé et une couche de sable. La concentration du sol permet un étalement de l'échantillon sur une épaisseur de 3 à 5 mm maximum. Toutes les graines sont donc exposées aux conditions d'émergence et de croissance de la serre. La mise en germination s'effectue en serre avec 15h de lumière par jour avec des fluctuations de température de 25 à 38°C suivant la période de l'été et une température de 15°C la nuit. La durée de mise en germination est de deux périodes de 5 à 6 semaines avec un retournement de l'échantillon entre les deux.

Après ces périodes de germination, les graines restantes sont tamisées à nouveau, triées manuellement et leur viabilité est évaluée (technique de la coupe) pour obtenir le nombre de graines viables par échantillon.

Suite à un essai préliminaire (section 3.3.1), l'utilisation d'une méthode mixte s'est avéré la mieux adaptée pour cette étude (section 3.3.2). Toutefois, des modifications ont été apportées à la méthode de Heerdt et coll. (1996). Ces dernières sont présentées dans la méthodologie expérimentale du chapitre 3.

## 1.4 Références bibliographiques

**Anderson, D.M., Swanton, J. C., Hall, J. C., Mersey, B. G.**, 1993a. The influence of soil moisture, simulated rainfall and time of application on the efficacy of glufosinate-ammonium. *Weed Research*, 33(2), 149-160.

**Anderson, D.M., Swanton, J. C., Hall, J. C., Mersey, B. G.**, 1993b. The influence of temperature and relative humidity on the efficacy of glufosinate-ammonium. *Weed Research*, 33(2), 139-147.

**Anonyme**, 2008a. Beaucoup de producteurs sacrifient le rendement dans leur maïs tolérant au glyphosate. *Le bulletin des agriculteurs*. [En ligne].

[http://www.lebulletin.com/informations/actualite/article.jsp?content=20080509\\_172645\\_7228](http://www.lebulletin.com/informations/actualite/article.jsp?content=20080509_172645_7228) [Accédé le 22 février 2009].

**Anonyme**, 2009a. Herbicide Liberty 200 SN . BAYER CROPSCIENCE INC. [En ligne] <http://fr.bayercropscience.ca/Products/Herbicides/Liberty-200.aspx> [Accédé le 6 mars 2009].

**Anonyme**, 2009b. Liberty 200 SN. BAYER CROPSCIENCE INC. [En ligne]. <http://www.bayercropscience.ca/Products/Herbicides/Liberty-200.aspx> [Accédé le 30 janvier 2009].

**Anonyme**, 2009c. OGM : Utilisation actuelle : Tolérance aux herbicides : Maïs-grain. *Portail du gouvernement Québécois sur les organismes génétiquement modifiés*. [En ligne]. [http://www.ogm.gouv.qc.ca/tole\\_herb\\_maïs\\_grain.html](http://www.ogm.gouv.qc.ca/tole_herb_maïs_grain.html) [Accédé le 5 mars 2009].

**Anonyme**, 2009d. Programme de réduction des risques liés aux pesticides. *Agriculture et Agroalimentaire Canada*. [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1181137029350&lang=fra> [Accédé le 22 février 2009].

**Anonyme**, 2008b. PRR06-380 - Détermination des doses minimales biologiquement efficaces d'herbicides pour le désherbage dans la rotation maïs-soya. *Agriculture et Agroalimentaire Canada*. [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1196792349822&lang=fra> [Accédé Février 22, 2009].

**Anonyme**, 2009e. Qu'est-ce qu'une stratégie de réduction des risques liés aux pesticides? *Agriculture et Agroalimentaire Canada*. [En ligne]. <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1181242889123&lang=fra> [Accédé Février 22, 2009].

- Anonyme**, 2009f. ru\_wmax\_label\_french.pdf (Objet application/pdf). *MONSANTO CANADA INC.* [En ligne].  
[http://www.monsanto.ca/\\_pdfs/labels\\_msds/ru\\_wmax\\_label\\_french.pdf](http://www.monsanto.ca/_pdfs/labels_msds/ru_wmax_label_french.pdf) [Accédé Janvier 30, 2009].
- Beckie, H.J.**, 2006. Herbicide-Resistant Weeds: Management Tactics and Practices1. *Weed Technology*, 20(3), 793-814 .
- Beckie, H.J.**, 2007. Beneficial management practices to combat herbicide-resistant grass weeds in the northern Great Plains. *Weed Technology*, 21(2), 290-299.
- Beriault, J.N., Horsman, G.P. & Devine, M.D.**, 1999. Phloem transport of D,L-glufosinate and acetyl-l-glufosinate in glufosinate-resistant and -susceptible *Brassica napus*. *Plant Physiology*, 121(2), 619-627.
- Blackshaw, R.E., O'Donovan, J. T., Harker, K. N., Clayton, G. W., & Stougaard R.N.**, 2006. Reduced herbicide doses in field crops: A review. *Weed Biology and Management*, 6(1), 10-17.
- Borggaard, O.K. & Gimsing, A.L.**, 2008. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Management Science*, 64(4), 441-456.
- Boström, U. & Fogelfors, H.**, 2002. Response of weeds and crop yield to herbicide dose decision-support guidelines. *Weed Science*, 50(2), 186-195.
- Bradshaw, L.D., Padgett, S. R., Kimball, S. L. & Wells, B. H.**, 1997. Perspectives on Glyphosate Resistance. *Weed Technology*, 11(1), 189-198.
- Brookes, G. & Barfoot, P.**, 2006. GM Crops: The First Ten Years - Global Socio-Economic and Environmental Impacts, International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications.
- Buhler, D.D. & Maxwell, B.D.**, 1993. Seed Separation and Enumeration from Soil Using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Centrifugation and Image Analysis. *Weed Science*, 41, 298-302.
- Cardina, J. & Sparrow, D.H.**, 1996. A Comparison of Methods to Predict Weed Seedling Populations from the Soil Seedbank. *Weed Science*, 44, 46-51.

**Cerdeira, A.L., Gazziero, D. L. P., O. Duke, S, Matallo, M. B., Spadotto, C. A., 2007.** Review of potential environmental impacts of transgenic glyphosate-resistant soybean in Brazil. *Journal of Environmental Science & Health, Part B -- Pesticides, Food Contaminants, & Agricultural Wastes*, 42(5), 539-549.

**Chouinard, N., 2004.** Comparaison de systèmes de désherbage dans le maïs et le soya tolérants aux herbicides avec un système de désherbage conventionnel. Mémoire de maîtrise. *Université Laval*, Québec, Canada.

**Claudio , S., 2005.** Glyphosate and glufosinate-ammonium runoff from a corn-growing area in Italy. *Agronomy for Sustainable Development*, 25(3), 407-412.

**Clive, J., 2008.** Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2007, International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications. [En ligne]. <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/37/pptslides/french/briefs-37-flashpaper-french.swf> [Accédé le 30 janvier 2009].

**Culpepper, A.S., 2006.** Glyphosate-Induced Weed Shifts. *Weed Technology*, 20(2), 277-281.

**Dalley, C.D., Kells, J.J. & Renner, K.A., 2004.** Effect of Glyphosate Application Timing and Row Spacing on Corn (*Zea mays*) and Soybean (*Glycine max*) Yields. *Weed Technology*, 18(1), 165-176.

**Devos, Y., Cougnon M., Vergucht S., Bulcke, R., Haesaert, G., Steurbaut, W. & Reheul, D., 2008a.** Environmental impact of herbicide regimes used with genetically modified herbicide-resistant maize. *Transgenic Research*, 17(6), 1059-1077.

**Dill, G.M., Jacob, C.A. & Padgett, S.R., 2008.** Glyphosate-resistant crops: adoption, use and future considerations. *Pest Management Science*, 64(4), 326-331.

**Doyle, P. & Stypa, M., 2004.** Reduced Herbicide Rates—A Canadian Perspective. *Weed Technology*, 18(4), 1157-1165 .

**Drolet, J. & Pigeon, S., 2009.** Suivi 2007 du Portrait agroenvironnemental des fermes du Québec , MAPAQ. [En ligne]. [http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/414BF0F8-B1CD-4457-8C09-55F227926648/0/Rp\\_final\\_0811.pdf](http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/414BF0F8-B1CD-4457-8C09-55F227926648/0/Rp_final_0811.pdf).

**Duke, S.O., 2005.** Taking stock of herbicide-resistant crops ten years after introduction. *Pest Management Science*, 61(3), 211-218.

**Duke, S.O. & Powles, S.B.**, 2008a. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 64(4), 319-325.

**Duke, S.O. & Powles, S.B.**, 2008b. Glyphosate-resistant weeds and crops. *Pest Management Science*, 64(4), 317-318.

**Ebert, E., Leist, K. & Mayer, D.**, 1990. Summary of safety evaluation toxicity studies of glufosinate ammonium. *Food and Chemical Toxicology*, 28(5), 339-349.

**Ellis, R., Hong, T. & Roberts, E.**, 1985. Handbooks for Genebanks No.2. Handbook of Seed Technology for Genebanks Vol. I. Principles and Methodology International board for plant genetic resources., Rome.

**Entz, M.H.**, 2005. Preventing Herbicide Resistance. *Management Practices for the Future*. Saskatoon, Saskatchewan, pp. 75-81.

**Fay, P.K. & Olson, W.A.**, 1978. Technique for separating weed seed from soil. *Weed Science*, 26, 530-533.

**Gianessi, L.P.**, 2005. Economic and herbicide use impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, 61(3), 241-245.

**Gianessi, L.P.**, 2008. Economic impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, 64(4), 346-352.

**Giguère, M.**, 2000. Les mauvaises herbes déjouent le glyphosate. *Le bulletin des agriculteurs*. [En ligne].  
[http://www.lebulletin.com/article.jsp?content=20000501\\_archives\\_0005e](http://www.lebulletin.com/article.jsp?content=20000501_archives_0005e) [Accédé le 30 janvier 2009]

**Giroux, I.**, 2002. Contamination de l'eau par les pesticides dans les régions de culture de maïs et de soya au Québec, Campagnes d'échantillonnage de 1999, 2000 et 2001 et évolution temporelle de 1992 à 2001, *Québec: ministère de l'Environnement, Direction du suivi de l'état de l'environnement*.

**Gower, S.A., Loux, M.M., Cardina, J., Harrison, S.K., Sprankle, P.L., Probst, N.J., Bauman, T.T., Bugg, W., Curran, W.S., Currie, R.S., Harvey, R.G., Johnson, W.G., Kells, J.J., Owen, M.D.K., Regehr, D.L., Slack, C.H., Spaur, M., Sprague, C.L., Vangessel, M. & Young, B.G., 2003.** Effect of Postemergence Glyphosate Application Timing on Weed Control and Grain Yield in Glyphosate-Resistant Corn: Results of a 2-Yr Multistate Study. *Weed Technology*, 17(4), 821-828.

**Green, J.M., Hazel, C.B., Forney, D.R. & Pugh, L.M., 2008.** New multiple-herbicide crop resistance and formulation technology to augment the utility of glyphosate. *Pest Management Science*, 64(4), 332-339.

**Gross, K.L., 1990.** A Comparison of methods for estimating seed numbers in the soil. *The Journal of Ecology*, 78, 1079-1093.

**Gross, K.L. & Renner, K.A., 1989.** A new method for estimating seed numbers in the soil. *Weed Science*, 37, 836-839.

**Grundy, A.C., 2003.** Predicting weed emergence: a review of approaches and future challenges. *Weed Research*, 43, 1-11.

**Hall, L.M., 2005.** How did we get here? Principles of Herbicide Resistance in Weeds. *Management Practices for the Future*. Saskatoon, Saskatchewan, pp. 68-74.

**Hamill, A.S., Knezevic, S.Z., Chandler, K., Sikkema, P.H., Tardif, F.J., Shrestha, A. & Swanton, C.J., 2000.** Weed control in glufosinate-resistant corn (*Zea mays*). *Weed Technology*, 14(3), 578-585.

**Heerdt, G.N.J.T., Verweij, G. L., Bekker, R. M. & Bakker J. P., 1996.** An Improved Method for Seed-Bank Analysis: Seedling Emergence After Removing the Soil by Sieving. *Functional Ecology*, 10, 144-151.

**Institut de la Statistique du Québec, 2000.** Grandes cultures. [En ligne]. [http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm\\_finnc/filr\\_bioal/culture/culture/index.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/culture/culture/index.htm) [Accédé le 29 janvier 2009].

**Ishikawa-Goto, M. & Tsuyuzaki, S., 2004.** Methods of estimating seed banks with reference to long-term seed burial. *Journal of Plant Research*, 117, 245-248.

**Klier, C., Grundmann, S., Gayler, S. & Priesack, E., 2008.** Modelling the Environmental Fate of the Herbicide Glyphosate in Soil Lysimeters. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 8(2), 187-207.

- Kovach, D.A., Thill, D.C. & Young, F.L.**, 1988. A Water-Spray System for Removing Seed from Soil. *Weed Technology*, 2, 338-341.
- Laitinen, P., Siimes, K., Eronen, L., Rämö, S., Welling, L., Oinonen, S., Mattsoff, L., Ruohonen-Lehto, M.**, 2006. Fate of the herbicides glyphosate, glufosinate-ammonium, phenmedipham, ethofumesate and metamitron in two Finnish arable soils. *Pest Management Science*, 62(6), 473-491.
- Leblanc, M., Cloutier, D. C, Benoit, D. L., Légère, A., Lemieux, C., Assémat, L., & Hamel C.**, 2004. Température de base pour la germination de quatre espèces de mauvaises herbes. *Agrosol*, 15, 18-22.
- Malenfant, N.**, 2006. Le Québec résiste toujours. *Le bulletin des agriculteurs*, 22-24.
- Malenfant, N. & Thérien, Y.**, 2005. De nouveaux outils à votre portée. *Le bulletin des agriculteurs*, 48-55.
- Mesgaran, M.B., Mashhadi, H. R., Zand, E., & Alizadeh, H. M.**, 2007. Comparison of three methodologies for efficient seed extraction in studies of soil weed seedbanks. *Weed Research*, 47, 472-478.
- Michaud, D.**, 2005. Impact environnemental des cultures transgéniques cultivées au Québec, Québec, Canada.
- Neve, P.**, 2008. Simulation modelling to understand the evolution and management of glyphosate resistance in weeds. *Pest Management Science*, 64(4), 392-401.
- Owen, M.D.**, 2008. Weed species shifts in glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, 64(4), 377-387.
- Owen, M.D. & Zelaya, I.A.**, 2005. Herbicide-resistant crops and weed resistance to herbicides. *Pest Management Science*, 61(3), 301-311.
- Parker, R.G., York, A.C. & Jordan, D.L.**, 2006. Weed Control in Glyphosate-Resistant Corn as Affected by Preemergence Herbicide and Timing of Postemergence Herbicide Application1. *Weed Technology*, 20(3), 564-570.
- Powles, S.B.**, 2008. Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. *Pest Management Science*, 64(4), 360-365.

- Puricelli, E. & Tuesca, D.**, 2005. Weed density and diversity under glyphosate-resistant crop sequences. *Crop Protection*, 24(6), 533-542.
- Putensen, H.**, 1882. Untersuchungen über die im Ackerboden enthaltenen Samereien. Hanoversches Land-und Forstwirth. Vereinsblatt. *Hildesheim.*, 21, 512-524.
- Roberts, H.**, 1981. Seed banks in soil. *Advances in Applied Biology*, 6, 1-56.
- Sawma, J.T. & Mohler, C.L., 2002. Evaluating Seed Viability by an Unimbibed Seed Crush Test in Comparison with the Tetrazolium Test. *Weed Technology*, 16, 781-786.
- Ruhland, M., Engelhardt, G. & Pawlizki, K.**, 2004. Distribution and metabolism of D/L-, L- and D-glufosinate in transgenic, glufosinate-tolerant crops of maize (*Zea mays* L ssp *mays*) and oilseed rape (*Brassica napus* L. var *napus*). *Pest Management Science*, 60(7), 691-696.
- Shaner, D.L.**, 2000. The impact of glyphosate-tolerant crops on the use of other herbicides and on resistance management. *Pest Management Science*, 56(4), 320-326.
- Sikkema, P.H., Shropshire, C., Hamill, A.S., Weaver, S.E., & Paul B. Cavers, P.B.**, 2005. Response of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) to glyphosate application timing and rate in glyphosate-resistant corn (*Zea mays*). *Weed Technology*, 19(4), 830-837 .
- Sikkema, P.H., Shropshire, C., Hamill, A.S., Weaver, S.E., & Paul B. Cavers, P.B.**, 2004. Response of Common Lambsquarters (*Chenopodium album*) to Glyphosate Application Timing and Rate in Glyphosate-Resistant Corn. *Weed Technology*, 18(4), 908-916.
- Sikkema, P.H. & Soltani, N.**, 2005. Herbicide-resistant crops in Eastern Canada. The first decade of herbicide-resistant crops in Canada. *Topics in Canadian Weed Science*. Niagara Falls, ON: Robert H. Gulden and Clarence J. Swanton, pp. 3-14.
- Smutny, V. & Kren, J.**, 2002. Improvement of an elutriation method for estimation of weed seedbank in the soil. *Rostlinna Vyroba*, 48, 271-278.
- Standifer, L.C.**, 1980. A Technique for Estimating Weed Seed Populations in Cultivated Soil. *Weed Science*, 28, 134-138.
- Steckel, G.J., Hart, S.E. & Wax, L.M.**, 1997. Absorption and Translocation of Glufosinate on Four Weed Species. *Weed Science*, 45(3), 378-381.

**Steckel, G.J., Wax, L.M., Simmons F.W., & Phillips, W.H.,** 1997. Glufosinate efficacy on annual weeds is influenced by rate and growth stage. *Weed Technology*, 11(3), 484-488.

**Tardif, F.J.,** 2005. Selection of herbicide resistance in weeds: the influence of herbicide-resistant crops. *The first decade of herbicide-resistant crops in Canada. Topics in Canadian Weed Science*. Niagara Falls, ON: Robert H. Gulden and Clarence J. Swanton, pp. 43-50.

**Thibault, P.,** 2006. Doses réduites d'herbicides. *Clubs conseils en agroenvironnement*. [En ligne] <http://www.clubsconseils.org/accueil/affichage.asp?B=767> [Accédé le 24 janvier 2009].

**Thompson, K. & Grime, J.P.,** 1983. A Comparative Study of Germination Responses to Diurnally-Fluctuating Temperatures. *The Journal of Applied Ecology*, 20, 141-156.

**Thompson, K. & Grime, J.P.,** 1979. Seasonal Variation in the Seed Banks of Herbaceous Species in Ten Contrasting Habitats. *The Journal of Ecology*, 67, 893-921.

**Thorsen, J.A. & Crabtree, G.,** 1977. Washing Equipment for Separating Weed Seed from Soil. *Weed Science*, 25, 41-42.

**Vereecken, H.,** 2005. Mobility and leaching of glyphosate: a review. *Pest Management Science*, 61(12), 1139-1151.

**Westhoven, A.M., Davis, V.M., Gibson, K.D., Weller, S.C., Johnson, W.G.,** 2008. Management of glyphosate-tolerant common lambsquarters (*Chenopodium album*) in glyphosate-resistant soybean. *Weed Technology*, 22(4), 628-634.

**Williams, G.M., Kroes, R. & Munro, I.C.,** 2000. Safety evaluation and risk assessment of the herbicide Roundup and its active ingredient, glyphosate, for humans. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*: 31, 117-65.

**Wiles, L.J., Barlin, D.H., Schweizer, E.E., Duke, H.R. & White, D.,** 1996. A New Soil Sampler and Elutriator for Collecting and Extracting Weed Seeds from Soil. *Weed Technology*, 10, 35-41.

**Young, B.G.,** 2006. Changes in Herbicide Use Patterns and Production Practices Resulting from Glyphosate-Resistant Crops. *Weed Technology*, 20(2), 301-307 .

## **2. Étude de doses réduites de glyphosate et de glufosinate d'ammonium dans diverses séquences de maïs et de soya : impacts culturels**

### **2.1 Résumé**

Huit séquences de cultures et quatre doses d'herbicide ont été testées dans un plan factoriel, en 2006, 2007 et 2008. La relation entre ces trois années est définie par huit séquences culturales : 1) Maïs RR/Maïs RR/Maïs RR, 2) Maïs LL/Maïs LL/Maïs LL, 3) Maïs RR/Maïs LL/Maïs LL, 4) Maïs LL/Maïs RR/Maïs LL, 5) Soya RR/Maïs RR/Maïs RR, 6) Maïs RR/Soya RR/Maïs RR, 7) Soya RR/Maïs LL/Maïs LL, 8) Maïs LL/Soya RR/Maïs LL. Pour chacune des huit séquences, quatre sous-parcelles ont reçu différentes doses de glyphosate ou de glufosinate :  $\frac{1}{2}$  dose,  $\frac{3}{4}$  dose, dose pleine (recommandée par le fabricant) et aucun herbicide. Les doses pleines sont de 0,9 kg / ha pour le glyphosate et de 0,5 kg / ha pour le glufosinate (+ 6 l / ha de sulfate d'ammonium). Durant les trois années de cette étude, les mêmes doses furent appliquées sur les mêmes sous-parcelles et le facteur années fut intégré au modèle statistique en sous-sous parcelle. Le recouvrement, la répression et la biomasse sèche des mauvaises herbes furent évalués, ainsi que le rendement en grains des cultures de maïs et de soya.

Les résultats montrent que l'efficacité de désherbage du glufosinate est inférieure à celle du glyphosate. Toutes les séquences culturales utilisant le glufosinate entraînent des niveaux de répression des graminées annuelles significativement inférieurs ( $P \leq 0,05$ ) par rapport aux séquences de référence (utilisant le glyphosate durant trois années consécutives), en monoculture de maïs ou en rotation de cultures maïs-soya. Le même constat est valable pour les répressions du chénopode blanc et de l'herbe à poux, sauf pour les séquences MLL-SRR-MLL et MLL-MRR-MLL qui ne sont pas significativement différentes des séquences de référence. Les rendements sont significativement ( $P \leq 0,05$ ) inférieurs pour les séquences utilisant le glufosinate, comparativement à celles n'utilisant que du glyphosate. Concernant l'utilisation de doses réduites, les séquences utilisant le glufosinate montrent des différences encore plus importantes lorsque la dose est réduite. Pour les séquences utilisant uniquement le glyphosate, la réduction de dose de moitié entraîne des différences significatives ( $P \leq 0,05$ ) de rendement comparativement à la dose pleine, ce qui n'est pas le cas de la dose trois-quarts. D'un point de vue agronomique, les séquences MLL-MRR-MLL et MLL-SRR-MLL présentent donc la solution la plus fiable permettant de remplacer une séquence utilisant uniquement le glyphosate. Cette conclusion n'est toutefois pas valable en présence de graminées annuelles. La réduction de dose de plus d'un quart n'est pas réalisable dans une telle rotation en raison des conséquences négatives sur la répression des mauvaises herbes et le rendement des cultures. La réduction de dose de glufosinate est totalement déconseillée.

## 2.2 Introduction

Depuis les dix dernières années, les surfaces cultivées avec des variétés génétiquement modifiées, tolérantes aux herbicides non sélectifs, n'ont cessé de croître dans le monde et l'utilisation du glyphosate en est la principale raison. Le glufosinate d'ammonium est le seul autre herbicide non sélectif qui présente une utilisation similaire, avec deux avantages majeurs : un mode d'action différent du glyphosate et aucun cas de résistance dans le monde à ce jour (Beckie 2007). Son utilisation est restée limitée, dû à son coût plus élevé, son efficacité moins grande et ses conditions d'applications plus rigoureuses que le glyphosate. Le glufosinate pourrait cependant présenter une solution de rechange à l'utilisation de glyphosate sans alternance. Son utilisation une ou deux fois dans une rotation de trois ans, qui inclurait le glyphosate, pourrait fournir un contrôle des mauvaises herbes et des rendements équivalents. Toutefois, cette hypothèse n'a jamais été testée. Cette question représente donc le premier enjeu de cette étude.

Pour y répondre une stratégie de traitement unique en postlevée de la culture et des mauvaises herbes a été mise en place sur des séquences culturales de trois années. À cela, une sous randomisation permet d'estimer l'impact de cette même stratégie en conditions de doses réduites. Le but étant d'évaluer le potentiel d'utilisation de doses réduites dans une rotation de glyphosate et de glufosinate. Cette question est le second enjeu de cette étude.

Ainsi, les hypothèses de recherche issues de ces deux problématiques sont :

- 1. Le glufosinate peut remplacer le glyphosate pour le désherbage du maïs en monoculture et en séquence avec le soya i.e. la répression des mauvaises herbes et les rendements seront équivalents entre les deux herbicides
- 2. Au bout de trois ans, le choix de la culture n'influence pas la répression des mauvaises herbes dans une séquence d'herbicide RR (Roundup Ready i.e. tolérant au glyphosate) uniquement et dans une séquence avec herbicides RR et LL (Liberty Link i.e. maïs tolérant au glufosinate) i.e. il n'y aura pas de différence de répression des mauvaises herbes entre le soya RR et le maïs RR.

L'objectif final est d'identifier une stratégie efficace, plus respectueuse de l'environnement et qui se situe dans une approche durable du point de vue de la résistance des mauvaises herbes dans la culture du maïs et du soya.

## 2.3 Méthodologie expérimentale

### 2.3.1 Localisation et disposition du site expérimental

Afin de répondre aux hypothèses et à l'objectif de cette étude, une expérience a été mise en place à la station agronomique de l'Université Laval à Saint-Augustin-de-Desmaures en 2006, 2007 et 2008. Le précédent cultural de la parcelle est du maïs sucré depuis plusieurs années et aucune culture tolérante au glyphosate ou au glufosinate n'y a été implantée auparavant. L'analyse de sol permet de qualifier les caractéristiques édaphiques du site (tableau 2-1).

**Tableau 2-1** Localisation et caractéristiques édaphiques du site expérimental (couche 0-20 cm).

Latitude (°)	46°43'40.67"N	pH-eau	6,3
Longitude (°)	71°30'7.32"O	CEC <sup>1</sup> (meq/100g)	15,7
Texture	Loam-sableux	MO <sup>2</sup> (%)	3,0
% sable	68	P (kg/ha)	363
% limon	15	K (kg/ha)	318
% argile	17		

<sup>1</sup> CEC, capacité d'échange cationique.

<sup>2</sup> MO, matière organique

La pluviométrie de l'année 2008 a été plus importante que les autres années surtout au mois de juin (annexes 2.1, 2.2, et 2.3). La parcelle qui accueille cette expérience est fortement infestée de mauvaises herbes et composée d'espèces de dicotylédones annuelles et de graminées annuelles. Ces deux types de mauvaises herbes ont permis de mesurer le comportement des deux herbicides dans une flore mixte. Les deux principales espèces de dicotylédones étaient le chénopode blanc (*Chenopodium album*) et l'herbe à poux (*Ambrosia artemisiifolia*). Les deux principales espèces de graminées étaient la sétaire glauque (*Setaria glauca*) et le panic d'automne (*Panicum dichotomiflorum*). Aucun ensemencement de mauvaises herbes n'a été nécessaire pour cet essai vu la distribution forte et homogène des quatre espèces principales sur tout le site.

### 2.3.2 Protocole et dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est un plan en tiroir avec huit parcelles principales (séquences de maïs RR (i.e. Roundup Ready, tolérant au glyphosate)/LL (i.e. Liberty Link, tolérant au glufosinate) et soya RR) (Tableau 2-2). Quatre séquences sont en monoculture de maïs et quatre séquences sont en rotation maïs-soya. Dans chacun de ces sous-groupes, on retrouve une alternance des deux herbicides ou une utilisation unique du glyphosate ou du glufosinate. Le soya tolérant au glufosinate n'étant pas encore commercialisé à ce jour au Canada, on ne retrouve donc pas cette culture dans les séquences de cette étude.

Quatre niveaux de doses de chacun des herbicides (0, 1/2, 3/4, 1X) sont alloués aux sous-parcelles (Tableau 2-3). La dose 0X correspond au témoin enherbé, non traité. La dose 1/2 X et 3/4 X sont les deux doses réduites et enfin la dose 1X correspond à la dose homologuée par le fabricant (Anonyme 2009b). Les doses sont exprimées en quantité de matière active appliquée par hectare. Le détail des doses utilisées par séquence culturale et par herbicide est présenté dans l'annexe 2.4. De plus, le glufosinate est appliqué en mélange avec du sulfate d'ammonium à la dose de 6 l/ha tel que le conseille l'étiquette du produit. Le produit commercial du glyphosate était le Roundup WeatherMax® et le Liberty 200SN® pour le glufosinate.

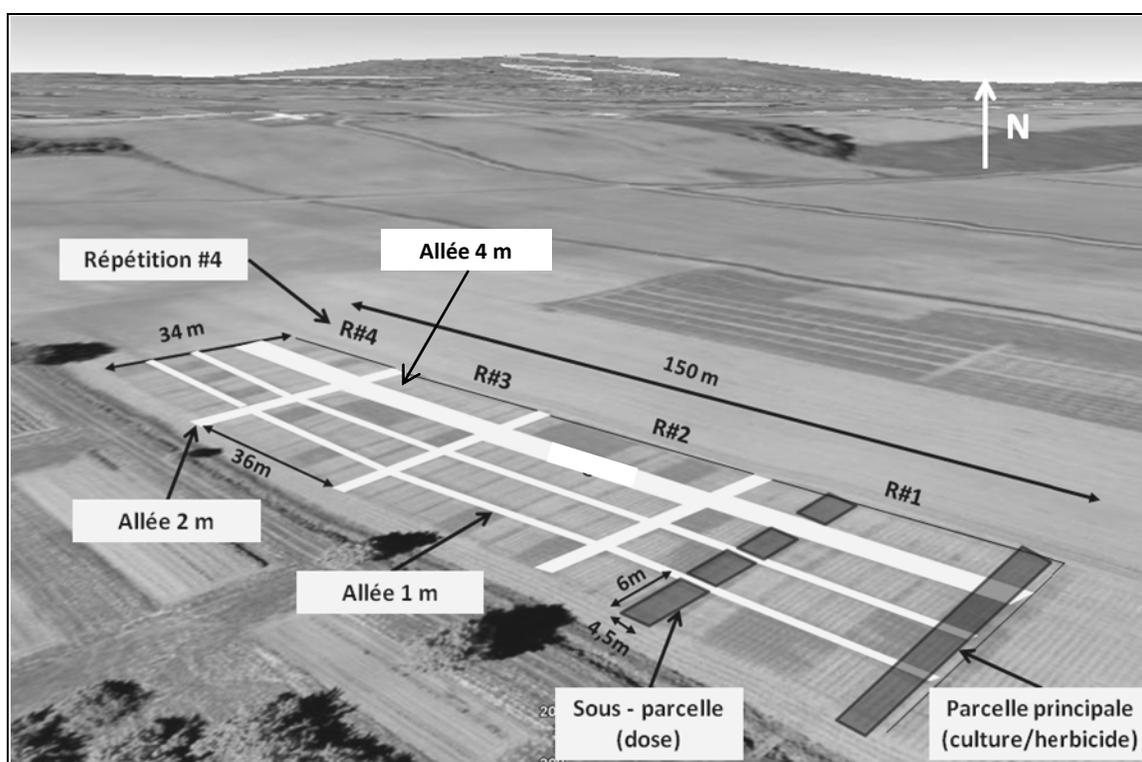
**Tableau 2-2** Séquences culturales (parcelles principales) évaluées de 2006 à 2008.

No.	Séquence 2006-2007-2008
1	Maïs RR- Maïs RR- Maïs RR
2	Maïs RR- Maïs LL- Maïs LL
3	Maïs RR- Soya RR- Maïs RR
4	Maïs LL- Maïs LL- Maïs LL
5	Maïs LL- Maïs RR- Maïs LL
6	Maïs LL- Soya RR- Maïs LL
7	Soya RR- Maïs RR- Maïs RR
8	Soya RR- Maïs LL- Maïs LL

**Tableau 2-3** Doses utilisées selon la culture/herbicide en 2006, 2007 et 2008.

Doses	Glyphosate (kg i.a./ha)	Glufosinate (kg i.a./ha)
0 X	0	0
1/2 X	0,45	0,25
3/4 X	0,675	0,375
1 X	0,90	0,50

Le dispositif factoriel est répété quatre fois chaque année. Le même site a été conservé pour les trois années de l'étude et l'essai a été disposé exactement au même endroit durant les trois années. Le but de cette démarche a été de répéter l'utilisation de la même dose sur la même sous-parcelle. La figure 2.1 présente le plan de l'essai à l'échelle de l'image satellite du site (ALTA Inc. 2007). Les séquences culturales sont randomisées aléatoirement dans chaque répétition. C'est le même cas pour les doses à l'intérieur de chaque parcelle principale. Cette randomisation est schématisée dans l'annexe 2.5 qui présente le plan de champ détaillé. La dimension des sous-parcelles est de 4,5 m sur 6 m.



**Figure 2-1** Plan de l'essai transposé sur l'image satellite du site.

Au début de chaque année les opérations de travail du sol ont été : un labour à l'automne suivi de deux passages de vibroculteur lourd au printemps avant le semis. Pour la culture de maïs un hybride tolérant simultanément les deux herbicides a été utilisé : le Pioneer 39H86 RR/LL®. Pour le soya, il s'agit d'un cultivar tolérant uniquement le glyphosate : le DKB 00-09 RR®. L'espacement entre les rangs de maïs est de 76 cm (6 rangs par parcelle) et la dose de semis de cette culture est de 75000 grains/ha. Pour le soya l'espacement entre les

rangs est de 36 cm (12 rangs par parcelle) et la dose de semis de 600000 grains/ha. Le tableau 2-4 présente les dates de semis et d'émergence de la culture pour chaque année. Le tableau 2-5 présente la fertilisation appliquée dans le maïs.

**Tableau 2-4** Date de semis et d'émergence des cultures en 2006, 2007 et 2008.

Année	2006		2007		2008
	Maïs	Soya	Maïs	Soya	Maïs
<b>Date de semis</b>	09 mai	30 mai	09 mai	25 mai	10 mai
<b>Date d'émergence</b>	24 mai	07 juin	25 mai	4 juin	25 mai

**Tableau 2-5** Fertilisation du maïs en 2006, 2007 et 2008.

Année	2006		2007		2008	
	Semis <sup>1</sup>	Volée <sup>2</sup>	Semis	Volée	Semis	Volée
<b>Type d'engrais</b>	19-17-13	27-0-0	16-15-11	27-0-0	16-15-11	27-0-0
<b>Quantité en kg/ha</b>	160	370	190	370	280	330

<sup>1</sup> Application en bande au semis

<sup>2</sup> Application à la volée au printemps

L'application des herbicides s'est effectuée en un seul passage en postlevée des mauvaises herbes et des cultures. Toutefois, les traitements ont été effectués à des stades déterminés des cultures : stade 4-5 feuilles pour le maïs et stade 3 feuilles trifoliolées pour le soya. Le traitement de glyphosate était effectué en premier suivi du traitement de glufosinate, ce dernier réagissant mieux lorsque la température est plus chaude (Anderson et coll. 1993b). Chaque année, le volume d'application était de 225 l/ha ; l'équipement de pulvérisation était un pulvérisateur MAT-OSU équipé de buses TJ-8002 DG espacées de 50 cm et à une hauteur de 50 cm. La pression de pulvérisation était de 275 kPa et la vitesse d'avancement de 3,2 km/h. Les conditions de traitement de chaque année sont présentées dans le tableau 2-6 pour le maïs et 2-7 pour le soya. De très bonnes conditions climatiques ont permis d'effectuer des traitements de précision, sans perte d'efficacité apparente ni de dérive d'herbicide dans les parcelles adjacentes. Un désherbage manuel et mécanique était

effectué suite au traitement entre les parcelles et dans les allées de l'essai afin que les mauvaises herbes à proximité des parcelles ne produisent des graines susceptibles de contaminer les parcelles traitées.

**Tableau 2-6** Conditions d'application des traitements dans le maïs en 2006, 2007 et 2008.

<b>Année</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
Date	12 juin	8 juin	13 juin
Heure	14h30-16h00	6h30-8h00	5h45-7h15
Température de l'air	23°C	15°C	15°C
Température du sol	20°C	12,5°C	13,5°C
Vitesse et direction du vent	5-10 km/h O	13 km/h NO	0-2 km/h NO
Agrégats	Fins	Fins	Fins
Couverture nuageuse	3%	80%	10%
Humidité du sol	Très humide	Humide	Humide
Dernière pluie avant application	11 juin-22,9 mm	7 juin-0,8 mm	11 juin-1,7 mm
Première pluie après application	19 juin-5,9 mm	17 juin-0,8 mm	14 juin-6,8 mm
Stade de la culture	5 feuilles	4 feuilles	4 feuilles
Stade des mauvaises herbes			
Herbe à poux	6 feuilles	4 feuilles	4 feuilles
Chénopode	8 feuilles	9 feuilles	8 feuilles
Graminées	3 feuilles	3 feuilles	1 feuille

**Tableau 2-7** Conditions d'application des traitements dans le soya en 2006 et 2007.

<b>Année</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>
Date	21 juin	22 juin
Heure	9h00-9h30	8h30-9h50
Température de l'air	26°C	18°C
Température du sol	24°C	16°C
Vitesse et direction du vent	5-10 km/h O	6 km/h NO
Agrégats	Fins	Fins
Couverture nuageuse	0%	20%
Humidité du sol	Très humide	Humide
Dernière pluie avant application	20 juin-3,5 mm	20 juin-4 mm
Première pluie après application	22 juin-2,7 mm	26 juin-2,6 mm
Stade de la culture	2 feuilles trif.	3 feuilles trif.
Stade des mauvaises herbes		
Herbe à poux	4 feuilles	4 feuilles
Chénopode	9 feuilles	9 feuilles
Graminées	plantules	plantules

### 2.3.3 Variables étudiées

Chaque année une série d'évaluations ont été effectuées sur les parcelles, en suivant le calendrier présenté dans le tableau 2-8. Les dates réelles des évaluations sont présentées à l'annexe 2.6.

**Tableau 2-8** Calendrier des évaluations pour chaque année

Période	T0 <sup>1</sup>	2 SAT <sup>2</sup>	5 SAT	8 SAT	16 SAT	Récolte
Phytotoxicité		X	X	X		
Recouvrement	X	X	X	X		
Efficacité		X	X	X		
Biomasse				X	X	
Rendement						X

<sup>1</sup> T0 : le jour du traitement

<sup>2</sup> SAT : semaine après traitement

#### 2.3.3.1 Phytotoxicité

Suite à chaque traitement, des estimations visuelles déterminant la présence et l'intensité des symptômes de phytotoxicité ont été effectuées à trois périodes consécutives. Pour cela une échelle de 0 à 100% a été utilisée. La valeur 0 correspond à l'absence de chlorose, de nécrose ou de feuilles déformées. A contrario, la valeur 100 correspond à la mort de tous les plants de la parcelle. Le retard de croissance ainsi que le tassement de la culture (effet nanisant) ont été aussi pris en compte dans cette évaluation. La comparaison était effectuée grâce à la parcelle non traitée la plus proche. Aucun cas de symptômes de phytotoxicité n'a été relevé durant les trois années, cette variable ne sera donc pas présentée dans les résultats.

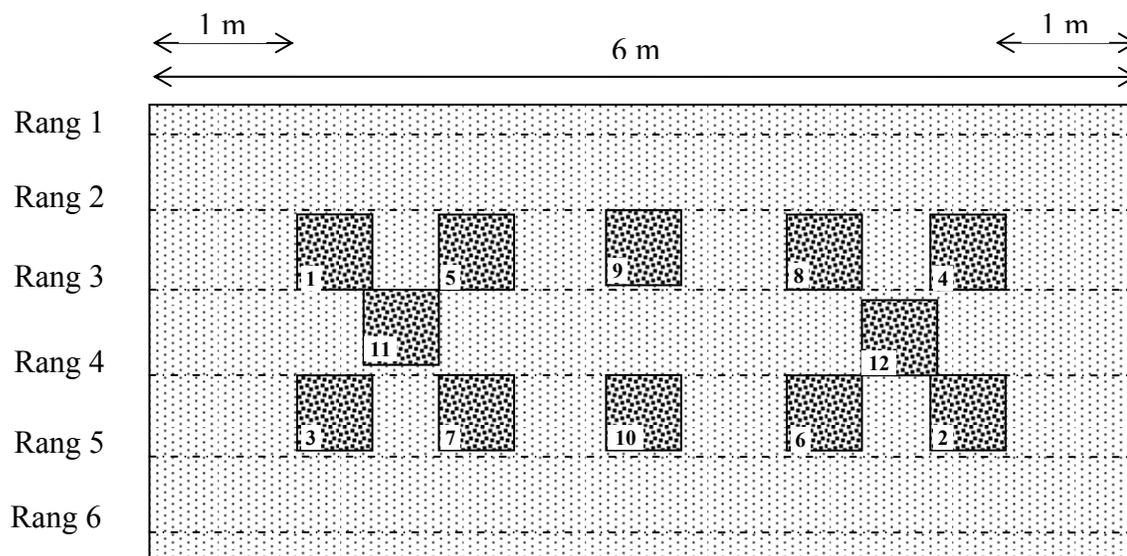
#### 2.3.3.2 Recouvrement des mauvaises herbes et répression des espèces dominantes

Le pourcentage de recouvrement des mauvaises herbes a été estimé visuellement aux mêmes moments que la phytotoxicité. La superficie (%) de la parcelle couverte par les mauvaises herbes a été estimé, permettant ainsi d'obtenir des données de recouvrement sur

une échelle de 0 à 100%, pour l'ensemble des espèces présentes. La répression des mauvaises herbes représente l'efficacité des traitements en comparaison aux parcelles non traitées (répression de 0%). Cette évaluation a été faite pour le chénopode blanc, l'herbe à poux et les graminées annuelles présentes dans cet essai. Les graminées sont regroupées sous une seule valeur à cause de la difficulté à noter les espèces séparément (les espèces étant très petites au moment de l'évaluation et de taille et de forme très similaires). La valeur 99 ou 100% est accordée lorsqu'aucune mauvaise herbe n'est présente dans la parcelle.

### 2.3.3.3 Biomasse sèche aérienne par espèces de mauvaises herbes

Pour évaluer cette variable à 8 et 16 semaines après le traitement, deux quadrats par parcelle de 50 cm x 50 cm ont été disposés suivant le schéma présenté dans la figure 2-2. Un même quadrat n'a jamais été placé au même endroit durant les trois années pour éviter une diminution de la biomasse sèche des mauvaises herbes engendré par la récolte de l'année précédente. Toutes les mauvaises herbes situées dans le quadrat #1 et #2 (3 et 4, etc.) étaient coupées au niveau du sol et classées dans des sacs par espèce (espèces principales) ou groupe d'espèces (espèces secondaires).



**Figure 2-2** Disposition dans une parcelle des quadrats pour la récolte des biomasses sèches

Quadrats 1 et 2 : 2006-8 SAT ; quadrats 3 et 4 : 2006-16 SAT ; quadrats 5 et 6 : 2007 8 SAT ; quadrats 7 et 8 : 2007-16 SAT ; quadrats 9 et 10 : 2008-8 SAT et quadrats 11 et 12 : 2008-16 SAT

Pour le soya, la disposition des quadrats est sensiblement la même avec cependant une superposition du quadrat sur le rang et non pas entre les rangs comme pour le maïs. Suite au prélèvement, les sacs étaient placés dans un séchoir pendant environ 5 jours à une température de 60°C. Après cette étape de séchage le poids sec était déterminé par la pesée du contenu des sacs, avec une balance électronique. La biomasse sèche était ensuite exprimée en g/m<sup>2</sup>.

#### **2.3.3.4 Rendement en grain du maïs et du soya**

À la maturité du grain, la récolte fut réalisée avec une moissonneuse-batteuse. Dans le maïs les quatre rangs du milieu de la parcelle furent récoltés et une largeur de 3 m dans le soya, toujours au centre de la parcelle pour éviter l'hétérogénéité des bordures. Préalablement, un dénombrement des plants de maïs avait été effectué. Cette étape permet de mesurer les pertes occasionnées durant la saison de croissance et d'ajuster le calcul du rendement en conséquence. À partir de cette donnée et de la mesure de l'humidité du grain à la récolte, le rendement de la culture est exprimé en Mg/ha ajusté à 15% d'humidité pour le maïs et exprimé en kg/ha pour la culture du soya (Annexe 2.7). L'analyse comparative du rendement des cultures a pu être réalisée en transformant les données de rendements du soya et de maïs, ceux-ci ne s'additionnant pas. Les comparaisons ont été effectuées sur le rendement relatif, exprimé en pourcentage du traitement de référence.

**En 2006** : pour le maïs et le soya, les parcelles traitées à la dose pleine de glyphosate étaient les traitements de références.

**En 2007** : pour le maïs, les parcelles traitées au glyphosate deux années de suite à dose pleine et pour le soya celles de la séquence maïs-soya glyphosate traitées à dose pleine, étaient les parcelles de références.

**En 2008** : les parcelles de la séquence de maïs trois années de suite, traitées au glyphosate à dose pleine étaient les parcelles de référence.

Les valeurs de référence ainsi qu'un exemple de calcul pour chaque année sont présentés à l'annexe 2.8.

## 2.3.4 Analyses statistiques

### 2.3.4.1 Analyse en mesures répétées avec la procédure MIXED

À la fin des séquences en 2008, les analyses statistiques doivent tenir compte de l'effet des différentes cultures et du changement ou non-changement d'herbicide des années précédentes. Les résultats de répression et de biomasse des mauvaises herbes et de rendements de chaque parcelle doivent tenir compte de l'effet combiné ou de l'effet simple des facteurs suivants :

- Évènements **passés** :
  - o les précédents culturaux : identiques ou différents
  - o les herbicides précédents : identiques ou différents
- Évènements **présents** :
  - o le type d'herbicide utilisé en 2008
- Évènements **communs aux trois années** :
  - o la dose de l'herbicide

Puisque le facteur « Doses » revient chaque année au même endroit (sous-parcelles), une analyse en mesures répétées est la plus appropriée. Le facteur « Années » représente donc la sous-sous-parcelle de l'expérience qui s'analyse comme un tiroir subdivisé. Pour cela, la procédure MIXED du logiciel SAS® a été utilisée pour analyser l'effet combiné des années, des séquences culturales et des doses d'herbicides. Cette procédure permet d'obtenir des erreurs types et des résultats de test plus précis qu'avec la procédure GLM (Piepho et coll. 2004). Au préalable, l'homogénéité des variances et la normalité des résidus ont été vérifiées. De plus, dans ce type d'analyse, il convient de choisir le type de matrice de covariance approprié afin de considérer la corrélation temporaire des données (Douglass 2004). Ce choix a été effectué grâce au critère d'information Akaike (AIC). La valeur la plus faible a été retenue après avoir soumis plusieurs structures (CS, AR(1), UN) pour une même variable. La structure retenue est Compound Symmetry (CS) dans quasiment tous les cas. La transformation des données a été nécessaire pour presque toutes les variables analysées sauf pour les rendements relatifs. La transformation choisie fut LOG (x+1) car elle permet de conserver les valeurs zéro du jeu de données. Cette étape a été

également réalisée dans SAS® avec un logarithme naturel (base 2,718). Le modèle présente des effets principaux et des interactions. Le Tableau 2-9 présente les sources de variation et les degrés de liberté pour chaque variable soumise à l'analyse de la variance.

**Effets principaux :**

*Séquences culturales* : effet moyen de la séquence culturale et de l'herbicide

*Doses* : effet moyen de la dose utilisée pendant trois ans

*Années* : effet moyen de l'année, c'est-à-dire des variations d'infestation entre les années

**Interactions :**

*Séquences x doses* : les variables évoluent en fonction de la séquence, mais aussi suivant la dose

*Séquences x années* : effet des grandes parcelles suivant l'année

*Doses x années* : effet de la dose suivant l'année

*Séquences x Doses x années* : interaction triple

**Tableau 2-9** Décomposition des sources de variation du modèle

	<i>Source de variation</i>	<i>Degrés de liberté</i>
<b>Sous-sous-parcelles</b>	384	383
<b>Sous-parcelles</b>	128	
<b>Grandes parcelles</b>	32	
	Séquences culturales	7
	Blocs	3
<b>Erreur Grandes Parcelles</b>	Blocs x Séquences culturales	21
	Doses d'herbicides	3
	Séquences culturales x Doses	21
<b>Erreur Sous-parcelles</b>	(Blocs x Doses) + (Blocs x Séquences culturales x Doses)	72
	Années	2
	Séquences culturales x Années	14
	Doses x Années	6
	Séquences culturales x Doses x Années	42
<b>Erreur Sous-sous-parcelles</b>	(Blocs x Années) + (Blocs x Séquences culturales x Années) + (Blocs x Doses x Années) + (Blocs x Séquences culturales x Doses x Années)	192

### 2.3.4.2 Tests statistiques

Pour répondre aux différentes hypothèses de cette étude, deux tests ont été effectués pour comparer les moyennes des traitements. Le premier porte sur des contrastes *a priori*. Ces derniers ont été déterminés en fonction des hypothèses de recherche et portent sur l'effet simple de la séquence culturale, en comparant les moyennes des trois années dans chaque séquence.

#### **Hypothèse #1 (H1) :**

Le glufosinate peut remplacer le glyphosate pour le désherbage du maïs en monoculture (H1 – A) et en séquence avec le soya (H1 – B) (Tableau 2-10).

Cette hypothèse porte donc sur l'effet de l'herbicide. Le but est de déterminer si le glufosinate peut-être un substitut au glyphosate.

#### **Hypothèse #2 (H2) :**

Au bout de trois ans, le choix de la culture n'influence pas la répression des mauvaises herbes dans une séquence d'herbicide RR uniquement (H2 – A) et dans une séquence avec herbicides RR et LL (H2 – B) (Tableau 2-10).

Cette hypothèse porte sur l'effet cultural, c'est-à-dire le remplacement du maïs par le soya uniquement dans les parcelles traitées au glyphosate.

**Tableau 2-10** Contraste a priori des séquences culturales pour les deux hypothèses de recherche

<b>Hypothèse</b>	<b>Contraste <i>a priori</i></b>
<b>H1 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL
	MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL
	MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL
<b>H1 - B</b>	SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR
	MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR
<b>H2 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR
	MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR
<b>H2 - B</b>	MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL
	MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL

La matrice des contrastes est présentée dans l'annexe 2.9. Le deuxième test, porte sur l'effet simple de la dose à l'intérieur d'une séquence. Il s'agit du test LSMEANS qui effectue toutes les comparaisons possibles entre les traitements par paire. Ce test nous permet donc de comparer l'effet moyen des différentes doses pour chaque séquence grâce à l'erreur type issue de ce test. Il s'agit de la même démarche que le test LSD sous PROC GLM. L'analyse s'effectue donc en deux temps à savoir : en premier lieu la détermination de l'effet global de la séquence et dans un second temps l'analyse de l'effet dose dans chaque séquence. La séquence de programmation détaillée est présentée à l'annexe 2.10.

## **2.4 Résultats et discussion : Impact des séquences et des doses d'herbicide**

### **2.4.1 Le recouvrement et la répression des mauvaises herbes**

#### **2.4.1.1 Recouvrement global le jour du traitement**

Le recouvrement global des mauvaises herbes le jour du traitement herbicide est une variable en lien avec le stock semencier présent dans le sol (Rahman et coll. 2006), mais qui dépend aussi des conditions climatiques au moment de la levée des espèces annuelles. L'analyse statistique révèle que sur la moyenne des trois années, le recouvrement est différent selon la séquence culturale, la dose utilisée d'herbicide et l'année de culture (Annexe 2.11 et Figure 2-3). En 2006, au début de cette expérience, le recouvrement des mauvaises herbes était d'environ 60% le jour du traitement (Figure 2-3). Le précédent cultural étant identique sur toutes les parcelles de cette étude, ce résultat est très homogène dans toutes les séquences. De plus, il démontre la forte pression des mauvaises herbes au site de l'étude.

#### Séquences culturales

Les comparaisons de séquences culturales ne montrent aucune différence significative suivant le choix de l'herbicide (Hypothèse H1, Tableau 2-11). On constate que globalement l'impact du précédent herbicide n'influence pas le recouvrement des mauvaises herbes l'année suivante. Toutefois, l'étude séparée de chaque année montre de faibles différences entre les séquences (Figure 2-3). On remarque qu'en 2007, année où l'infestation a été la plus forte, les différences entre les deux herbicides sont plus grandes à demi et trois quarts doses. En 2006, l'infestation globale étant faible, les différences ne sont presque pas visibles.

#### Doses d'herbicide

Le résultat du modèle (Annexe 2.11) montre une forte interaction entre la dose et l'année. On constate en effet que dès 2007, les parcelles non traitées en 2006 présentent un recouvrement significativement plus important que les parcelles traitées (Figure 2-4). Toutefois, les différences entre les parcelles traitées varient peu en 2007, mais de manière plus importante en 2008. Cette dernière année, on peut voir qu'il existait une différence

significative de recouvrement le jour du traitement, entre les parcelles traitées précédemment à dose pleine par rapport à celles qui avaient été traitées à dose réduite (Figure 2-4). Par conséquent, ce dernier point signifie peut-être que la banque de graines tend à augmenter et à s'accumuler dans les parcelles traitées à dose réduite. L'étude de la banque de graines au chapitre suivant viendra confirmer cette théorie.

### Cultures

La comparaison des séquences culturales (Hypothèse H2, Tableau 2-11) indique qu'il n'y a pas d'effet significatif de la culture dans la séquence sur le désherbage, sauf pour la séquence MLL-SRR-MLL (Hypothèse H2-B, Tableau 2-11). Le pourcentage de recouvrement pour cette séquence est significativement inférieur à celui de la séquence MLL-MRR-MLL. Le soya est implanté plus tardivement que le maïs, ainsi un faux semis supplémentaire est pratiqué et permettrait de réduire la levée précoce des mauvaises herbes. Cette théorie ne semble valable que lorsque le précédent est un maïs traité au glufosinate car la différence entre la séquence MRR-SRR-MRR et la séquence MRR-MRR-MRR ne montre pas de différences significatives (Hypothèse H2-A, Tableau 2-11).

**Tableau 2-11** Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance du pourcentage du recouvrement total le jour du traitement.

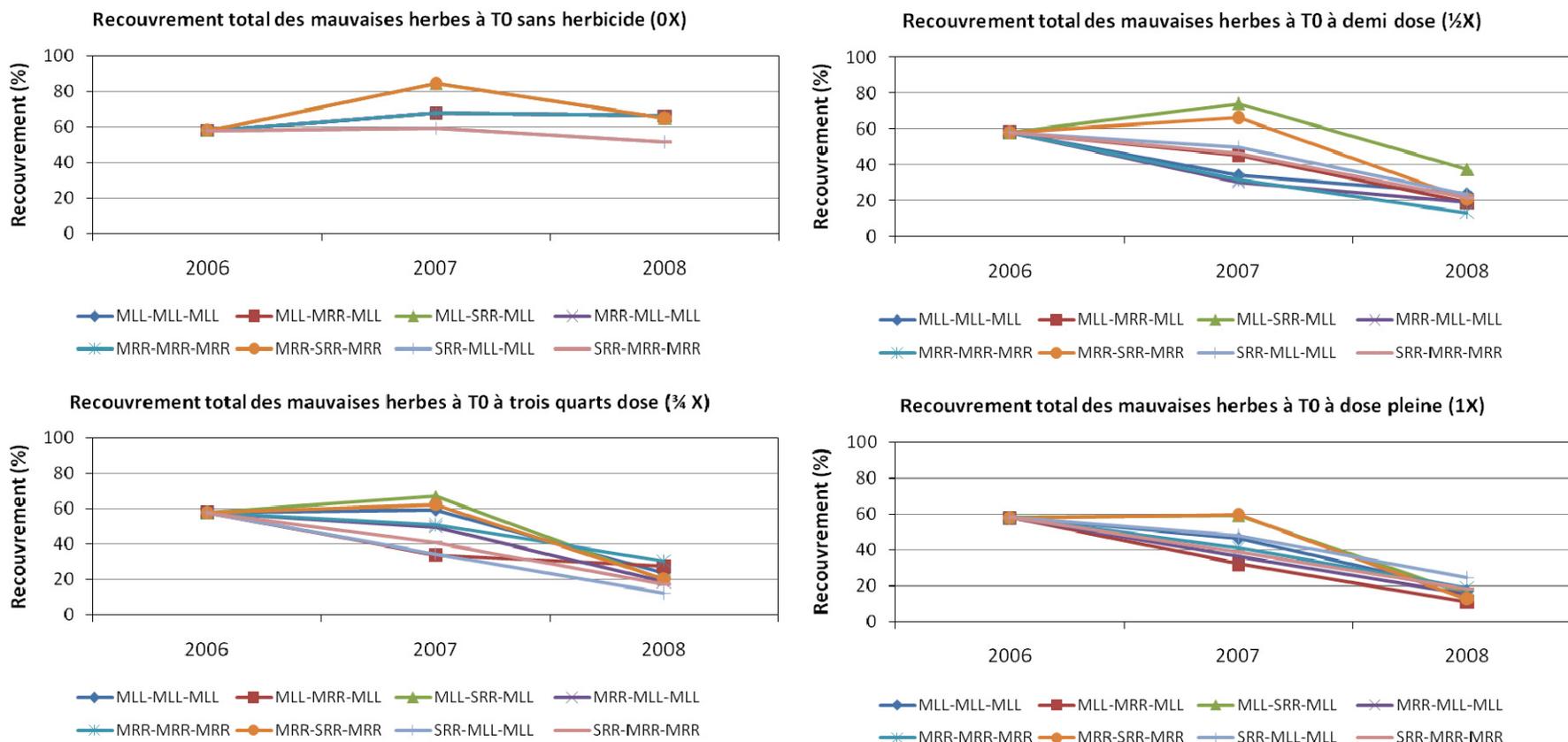
Hypothèse <sup>1</sup>	Contraste <i>a priori</i> <sup>1</sup>	T0 <sup>2</sup>			
		%	vs	%	F
<b>H1 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	45 <sup>3</sup>	vs	48	0.48
	MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	45	vs	45	0.46
	MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	45	vs	55	0.86
<b>H1 - B</b>	SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	45	vs	44	0.18
	MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	46	vs	52	1.35
<b>H2 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	45	vs	44	0.70
	MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	45	vs	52	3.11
<b>H2 - B</b>	MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	45	vs	45	0.07
	MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	55	vs	46	14.85

<sup>1</sup> Voir Tableau 2-10 et Annexe 2.4

<sup>2</sup> T0 = Le jour du traitement

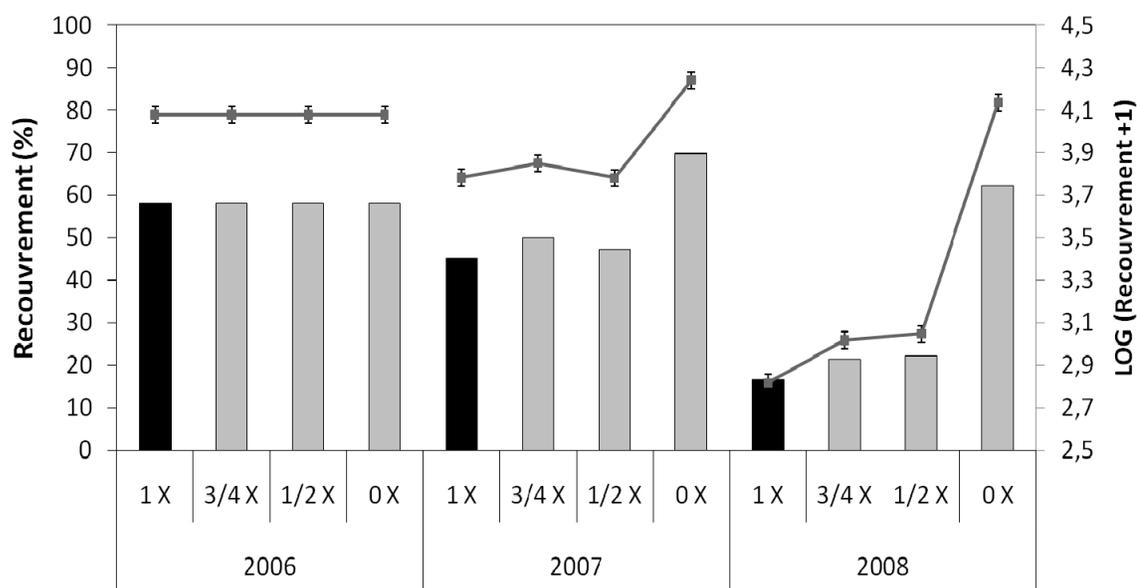
<sup>3</sup> Moyenne des quatre doses (0X, 1/2 X, 3/4 X et 1X), des trois années (2006, 2007 et 2008) et des quatre répétitions

\*, \*\*, \*\*\*, respectivement P≤0,05, P≤0,01 et P≤0,001



**Figure 2-3** Pourcentage de recouvrement total le jour du traitement dans les parcelles non traitées et traitées chaque année à la dose d'herbicide  $\frac{1}{2} X$ ,  $\frac{3}{4} X$  et  $1 X$  pour les huit séquences culturales testées.

Chaque courbe représente une séquence définie par la culture et l'herbicide utilisés en 2006, 2007 et 2008. MRR = maïs Roundup Ready®, MLL = maïs Liberty Link® et SRR = soya Roundup Ready®.



**Figure 2-4** Pourcentage de recouvrement total le jour du traitement dans les parcelles non traitées et traitées chaque année à la dose d'herbicide  $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1 X pour les trois années de cultures.

Chaque barre ( $\square$ ) représente le pourcentage moyen de recouvrement des mauvaises herbes (%) pour les quatre doses d'herbicide utilisées en 2006, 2007 et 2008. Les barres noires sont les doses de référence (utilisation de la dose 1X chaque année). Les erreurs types ( $\pm$ ) de chaque point des courbes ( $\text{---}$ ) permettent de comparer les doses à l'intérieur d'une même année pour la variable transformée (LOG (Recouvrement+1)).

Les résultats de l'analyse statistique du recouvrement global des parcelles par les mauvaises herbes à 2, 5 et 8 semaines après traitement sont présentés à l'annexe 2.11. Ces résultats ne sont pas présentés sous forme graphique. Cependant, l'étude des contrastes montre des différences significatives entre les séquences utilisant le glufosinate et celles utilisant le glyphosate dès la deuxième semaine après traitement, et se maintiennent par la suite. Pour comprendre les raisons de ces différences, l'étude de la répression des mauvaises herbes par espèce et des biomasses sèches est plus appropriée (sections suivantes). Ces variables permettront de déterminer quelles espèces ou groupes d'espèces sont responsables de l'augmentation de recouvrement ce que ne permet pas le recouvrement global.

#### 2.4.1.2 Répression de *Chenopodium album*

La répression du chénopode blanc est différente selon la séquence culturale, la dose utilisée d'herbicide et l'année de culture (Annexe 2.12 et Figure 2-5). On constate qu'en moyenne toutes les séquences ont procuré des niveaux de répression du chénopode blanc supérieurs à 80% et ce, quelle que soit la dose d'herbicide (Figure 2-6).

##### Séquences culturales

Les comparaisons de séquences culturales montrent des différences significatives suivant le choix de l'herbicide (Hypothèse H1, Tableau 2-12). On constate que l'utilisation durant trois années de suite du glufosinate ne procure pas des répressions aussi fortes que l'utilisation trois années de suite du glyphosate. Il en est de même lorsqu'on utilise le glufosinate deux années de suite. Cependant, les séquences où le glyphosate est utilisé entre deux années de glufosinate ne sont pas significativement différentes des séquences de référence (i.e. glyphosate durant trois années de suite). L'utilisation du glufosinate semble donc préférable en rotation avec le glyphosate et sans l'utiliser durant deux années de suite. Les séquences où il y a alternance des cultures (maïs et soya) montrent les mêmes résultats (Tableau 2-12).

##### Doses d'herbicide

Les comparaisons des doses d'herbicide au sein de chaque séquence culturale nous informent sur la possibilité d'une réduction de dose dans les séquences traitées au glyphosate en continu (Figure 2-6). Ceci confirme les résultats de Sikkema et coll (2004) sur la possibilité de réduire les doses de glyphosate de moitié pour le contrôle du chénopode blanc. Pour les séquences utilisant les deux herbicides, la demi-dose semble déconseillée, car elle procure des niveaux de répression inférieurs à la dose pleine. La dose trois-quarts semble mieux tenir la comparaison avec la dose pleine, mais uniquement dans les séquences où le glufosinate n'apparaît pas deux années de suite. Dans la séquence utilisant trois années de suite le glufosinate, l'emploi de doses réduites est à proscrire, car il entraîne des pertes significatives d'efficacité contre *Chenopodium album*. Ceci confirme les

résultats de l'étude de Chouinard (2004), qui montrait une répression du chénopode réduite d'au moins 20% sans réduction de dose du glufosinate.

### Cultures

La comparaison des séquences culturales (Hypothèse H2, Tableau 2-12) indique qu'il n'y a pas d'effet significatif de la culture dans la séquence sur le désherbage de *Chenopodium album*. Il n'y a aucune différence de répression de *Chenopodium album* entre une séquence qui utilisera du soya RR plutôt que du maïs RR. Il est à noter que l'année 2008 a été marquée par des infestations de chénopode blanc moins importantes, résultant en une excellente répression du chénopode, quels que soient l'herbicide et la dose utilisés (Figure 2-5).

**Tableau 2-12** Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance du pourcentage de répression de *Chenopodium album* à 2, 5 et 8 SAT.

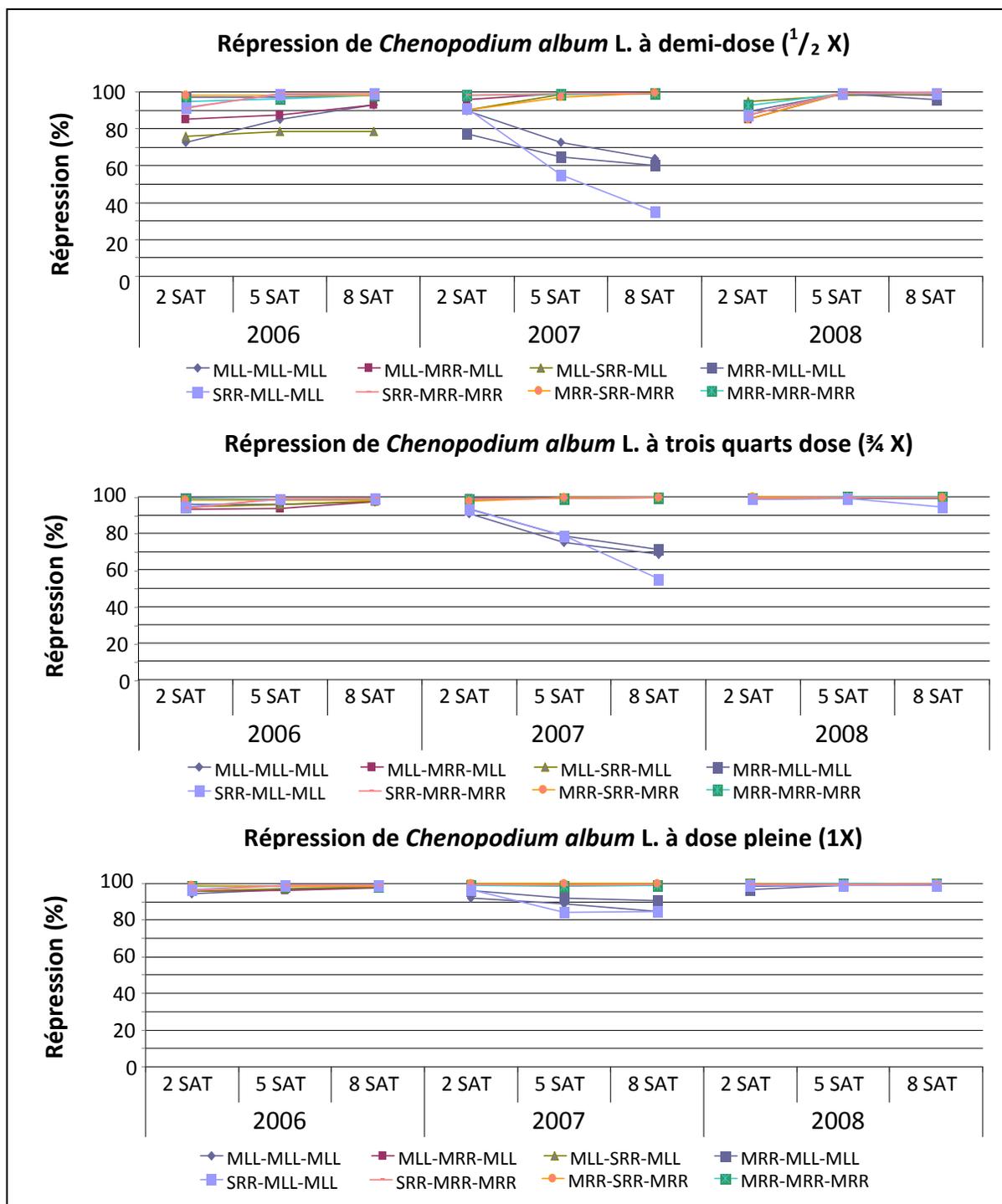
Hypothèse <sup>1</sup>	Contraste a priori <sup>1</sup>	2 SAT <sup>2</sup>			5 SAT			8 SAT		
		%	%	F	%	%	F	%	%	F
<b>H1 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	98 <sup>3</sup>	vs 91	23.96 ***	99	vs 90	25.81 ***	99	vs 89	12.70 **
	MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	98	vs 94	8.46 **	99	vs 92	20.85 ***	99	vs 90	11.41 **
	MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	98	vs 95	5.33 *	99	vs 97	0.89	99	vs 98	0.09
<b>H1 - B</b>	SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	94	vs 96	1.30	90	vs 99	32.00 ***	85	vs 99	35.17 ***
	MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	94	vs 96	3.45	96	vs 99	2.27	97	vs 99	0.77
<b>H2 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	98	vs 96	1.75	99	vs 99	0.05	99	vs 99	0.01
	MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	98	vs 96	0.89	99	vs 99	0.00	99	vs 99	0.00
<b>H2 - B</b>	MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	94	vs 94	0.19	92	vs 90	0.71	90	vs 85	6.15 *
	MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	95	vs 94	0.24	97	vs 96	0.26	98	vs 97	0.33

<sup>1</sup> Voir Tableau 2-10 et Annexe 2.4

<sup>2</sup> SAT = Semaine après traitement

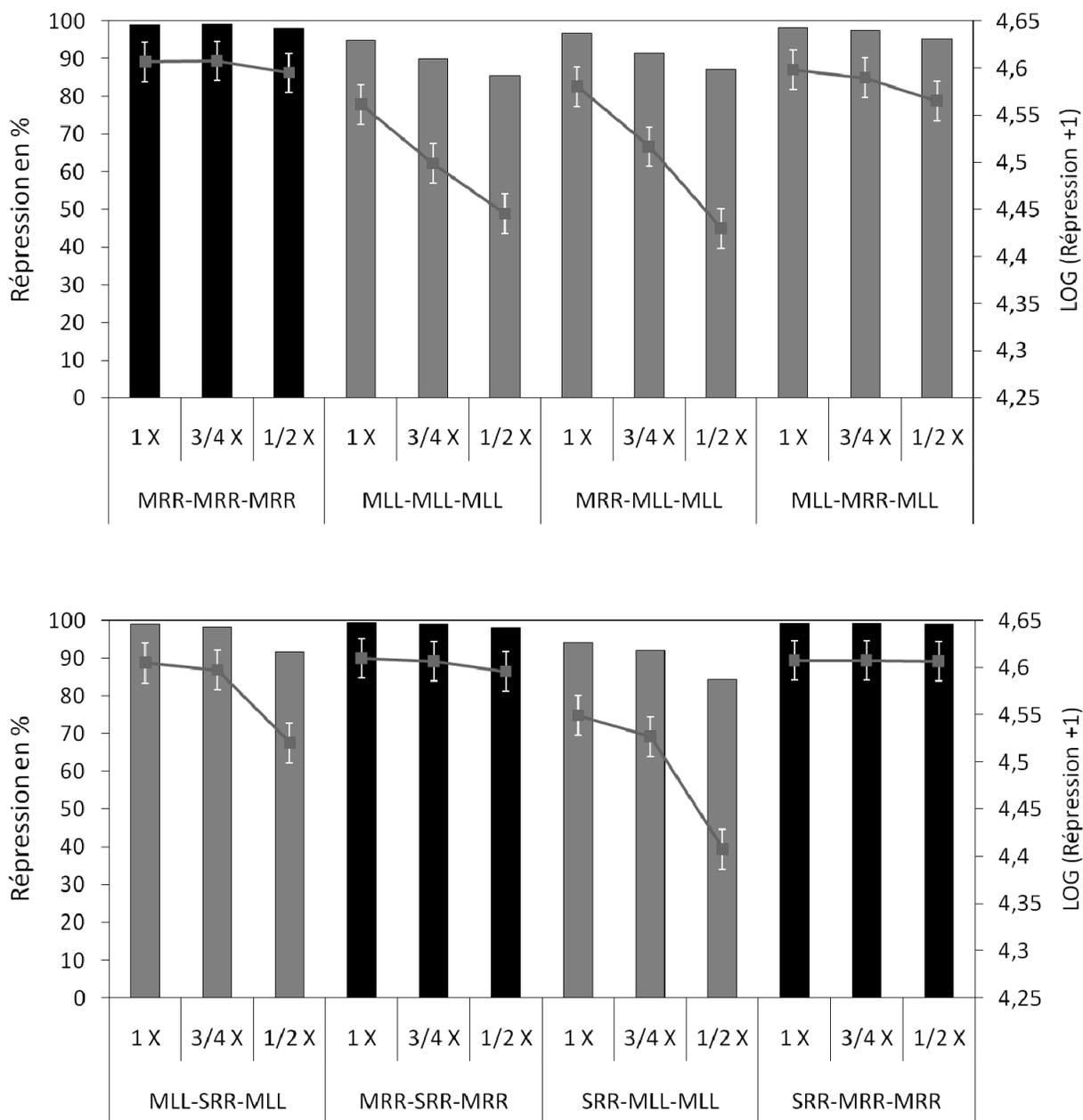
<sup>3</sup> Moyenne des trois doses d'herbicides ( $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1X), des trois années (2006, 2007 et 2008) et des quatre répétitions

\*, \*\*, \*\*\*, respectivement  $P \leq 0,05$ ,  $P \leq 0,01$  et  $P \leq 0,001$



**Figure 2-5** Pourcentage de répression du *Chenopodium album* à 2, 5 et 8 SAT dans les parcelles traitées chaque année à  $1/2$  X,  $3/4$  X et 1 X la dose d'herbicide pour les huit séquences culturales testées.

Chaque courbe représente une séquence définie par la culture et l'herbicide utilisés en 2006, 2007 et 2008. MRR = maïs Roundup Ready®, MLL = maïs Liberty Link® et SRR = soya Roundup Ready®.



**Figure 2-6** Pourcentage moyen de répression de *Chenopodium album* à 5 SAT dans les parcelles traitées à  $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1X la dose d'herbicide ; moyenne des trois années de la séquence culturale.

Chaque barre (□) représente le pourcentage moyen de répression (%) pour les trois années d'une séquence culturale. Les barres noires sont les séquences de référence (utilisation de glyphosate durant les trois années). Les erreurs types (±) de chaque point des courbes (—) permettent de comparer les doses à l'intérieur d'une même séquence culturale pour la variable transformée (LOG (Répression+1)).

### 2.4.1.3 Répression d'*Ambrosia artemisiifolia*

Le pourcentage de répression de l'herbe à poux diffère selon la séquence culturale, la dose d'herbicide utilisée et l'année de culture (Annexe 2.13 et Figure 2.7). On constate que le pourcentage moyen de répression de l'herbe à poux est supérieur à 80% pour toutes les séquences et quelle que soit la dose (Figure 2-8).

#### Séquences culturales

Les comparaisons des séquences culturales montrent qu'il n'y a pas d'effet herbicide sur la répression de cette espèce, sauf pour la séquence employant le glufosinate trois années de suite qui tend à montrer une différence significative (Hypothèse H1-A, Tableau 2-13). Le glufosinate peut donc être un bon remplaçant du glyphosate pour le désherbage de cette espèce, quelle que soit la séquence culturale.

#### Doses d'herbicide

Les comparaisons de doses au sein de chaque séquence culturale nous informent sur la possibilité d'une réduction de dose dans les séquences traitées au glyphosate en continu dans une monoculture de maïs (Figure 2-8). Dans une utilisation en rotation maïs-soya le glyphosate apporte des différences significatives de répression s'il est utilisé à demi-dose. Pour les séquences utilisant les deux herbicides, la demi-dose et la dose trois-quarts semblent déconseillées, car elles procurent des niveaux de répression inférieurs à la dose pleine. Dans la séquence utilisant trois années de suite le glufosinate, l'emploi de la dose trois-quarts semble réalisable, car cette dose n'entraîne pas des pertes significatives d'efficacité contre l'herbe à poux contrairement à la demi-dose. L'année 2008 a été marquée par des infestations d'herbe à poux similaires aux années 2006 et 2007. Le pourcentage de répression a varié selon la dose de l'herbicide utilisé, mais peu selon l'herbicide. Cela confirme donc que les deux herbicides sont conseillés pour la répression de la petite herbe à poux avec une mise en garde contre l'utilisation de la demi-dose de glyphosate.

## Cultures

La comparaison des séquences culturales (Hypothèse H2, Tableau 2-13) indique qu'il n'y a pas d'effet du choix de la culture sur le désherbage. Il n'y a aucune différence de répression d'*Ambrosia artemisiifolia* entre une séquence qui utilisera du soya RR plutôt que du maïs RR.

**Tableau 2-13** Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance du pourcentage de répression d'*Ambrosia artemisiifolia* à 2, 5 et 8 SAT.

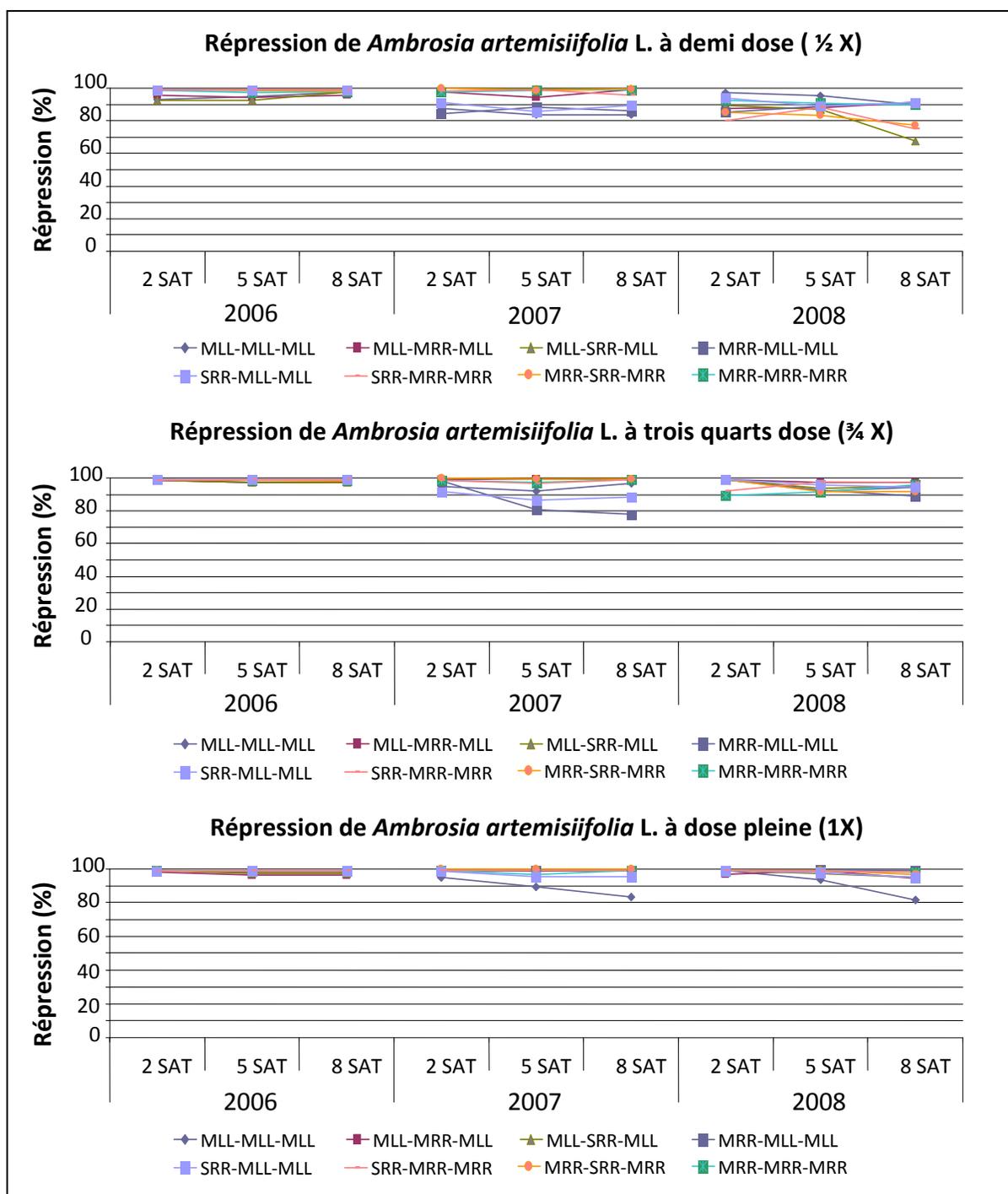
Hypothèse <sup>1</sup>	Contraste <i>a priori</i> <sup>1</sup>	2 SAT <sup>2</sup>			5 SAT			8 SAT					
		%	%	F	%	%	F	%	%	F			
<b>H1 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	97 <sup>3</sup>	vs	96	0.69	97	vs	93	3.63	97	vs	91	5.76
	MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	97	vs	96	1.33	97	vs	94	2.18	97	vs	93	3.22
	MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	97	vs	97	0.01	97	vs	96	0.04	97	vs	97	0.07
<b>H1 - B</b>	SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	97	vs	96	0.32	94	vs	97	2.76	92	vs	96	2.50
	MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	98	vs	98	0.04	96	vs	96	0.03	94	vs	96	0.44
<b>H2 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	97	vs	96	0.68	97	vs	97	0.17	97	vs	96	0.53
	MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	97	vs	98	0.34	97	vs	96	0.00	97	vs	96	0.51
<b>H2 - B</b>	MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	96	vs	97	0.80	94	vs	94	0.05	93	vs	92	0.26
	MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	97	vs	98	0.26	96	vs	96	0.00	97	vs	94	1.24

<sup>1</sup> Voir Tableau 2-10 et Annexe 2.4

<sup>2</sup> SAT = Semaine après traitement

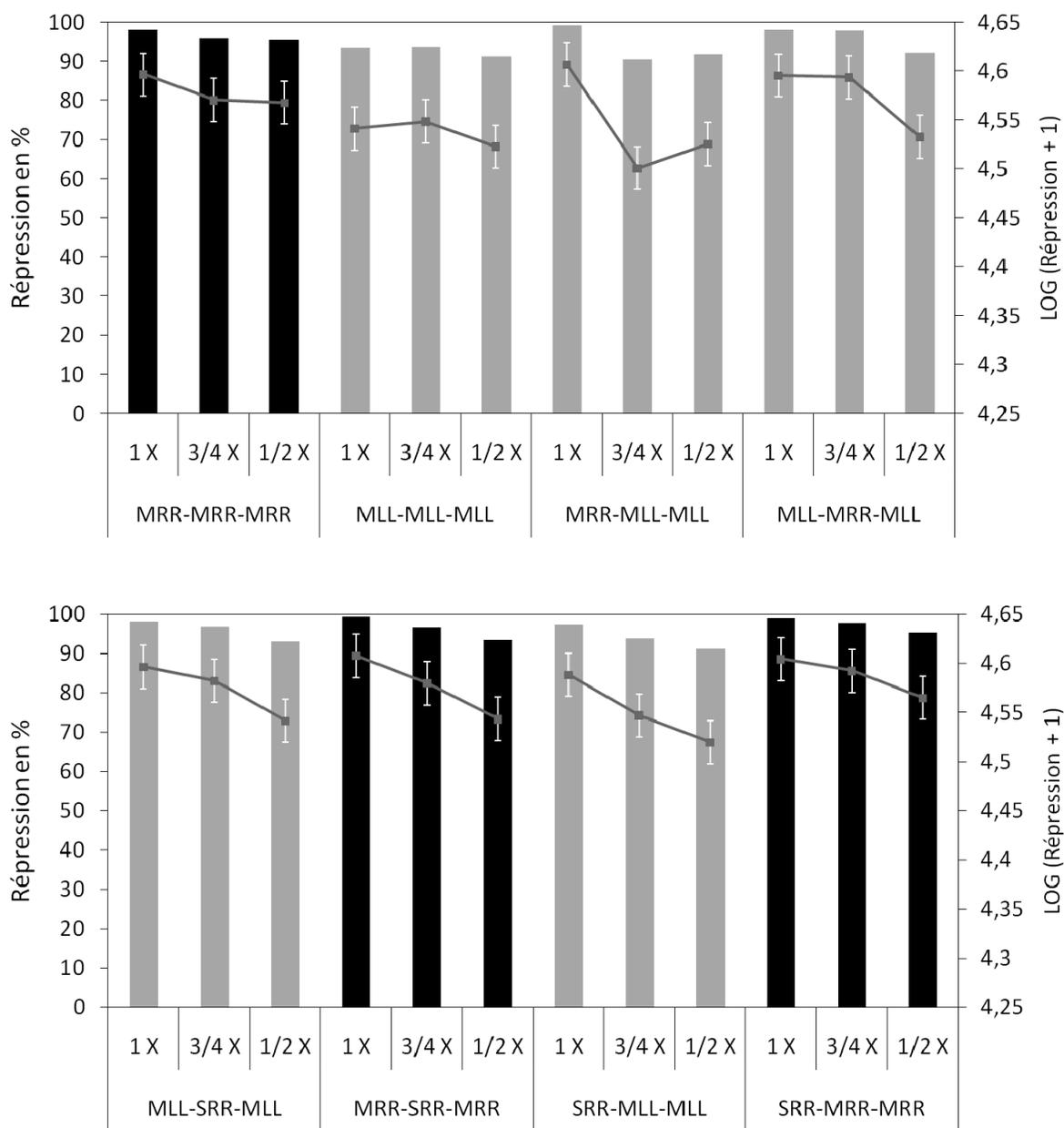
<sup>3</sup> Moyenne des trois doses d'herbicides ( $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1X), des trois années (2006, 2007 et 2008) et des quatre répétitions

\*, \*\*, \*\*\*, respectivement  $P \leq 0,05$ ,  $P \leq 0,01$  et  $P \leq 0,001$



**Figure 2-7** Pourcentage de répression d’*Ambrosia artemisiifolia* à 2, 5 et 8 SAT dans les parcelles traitées chaque année à ½ X, ¾ X et 1 X la dose d’herbicide pour les huit séquences culturales testées.

Chaque courbe représente une séquence définie par la culture et l’herbicide utilisés en 2006, 2007 et 2008. MRR = maïs Roundup Ready®, MLL = maïs Liberty Link® et SRR = soya Roundup Ready®.



**Figure 2-8** Pourcentage moyen de répression d'*Ambrosia artemisiifolia* à 5 SAT dans les parcelles traitées à  $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1X la dose d'herbicide ; moyenne des trois années de la séquence culturale.

Chaque barre (□) représente le pourcentage moyen de répression (%) pour les trois années d'une séquence culturale. Les barres noires sont les séquences de référence (utilisation de glyphosate durant les trois années). Les erreurs types (±) de chaque point des courbes (—) permettent de comparer les doses à l'intérieur d'une même séquence culturale pour la variable transformée (LOG (Répression+1)).

#### **2.4.1.4 Répression des graminées annuelles**

Le pourcentage de répression des graminées annuelles diffère selon la séquence culturale, la dose d'herbicide utilisée et l'année de culture (Annexe 2.14 et Figure 2-9). On constate qu'il y a de très fortes différences de niveau de la répression, contrairement aux deux espèces de dicotylédones annuelles vues précédemment.

##### Séquences culturales

La comparaison des séquences culturales montre des différences significatives entre les séquences où il y a du glufosinate et celle où cet herbicide n'est pas utilisé (Hypothèse H1, Tableau 2-14). Globalement aucune séquence utilisant le glufosinate ne peut remplacer les séquences de référence utilisant uniquement du glyphosate. La raison majeure est le manque d'efficacité du glufosinate contre les graminées annuelles (Figures 2-9 et 2-10), que ce soit en monoculture de maïs ou dans une rotation de maïs-soya.

##### Doses d'herbicide

Les comparaisons de doses d'herbicide au sein de chaque séquence nous informent sur la possibilité d'une réduction de dose dans les séquences traitées au glyphosate en continu dans une rotation maïs-soya (Figure 2-10). Dans la rotation employant uniquement du glyphosate en monoculture du maïs, la demi-dose montre une différence significative d'efficacité par rapport à la dose pleine. Dans les monocultures de maïs qui utilisent les deux herbicides, la réduction de doses est à proscrire, car elle entraîne des baisses de niveaux de répression des graminées de l'ordre de 50 à 60%. Les séquences employant les deux herbicides, mais dans une rotation maïs-soya apporte les mêmes conclusions avec quand même une amélioration si le soya RR est placé en tête de rotation. L'étude de Chouinard (2004) ne montrait pas de réduction significative de la répression de la sétaire verte à dose pleine du glufosinate. Les résultats de cette étude semblent donc en contradiction avec ceux présentés ici. Il se peut que la sétaire verte soit plus sensible au glufosinate que la sétaire jaune et le panic d'automne (les deux espèces de graminées majeures de notre site). De plus, il se peut que la pression de graminées annuelles soit plus forte dans notre étude que dans celle de Chouinard.

## Cultures

Les contrastes a priori (Hypothèse H2, Tableau 2-14) indiquent que le choix de la culture dans la séquence culturale n'influence pas le désherbage des graminées annuelles. Il n'y a aucune différence de répression des graminées annuelles entre une séquence qui utilisera du soya RR plutôt que du maïs RR.

**Tableau 2-14** Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance du pourcentage de répression des graminées annuelles à 2, 5 et 8 SAT.

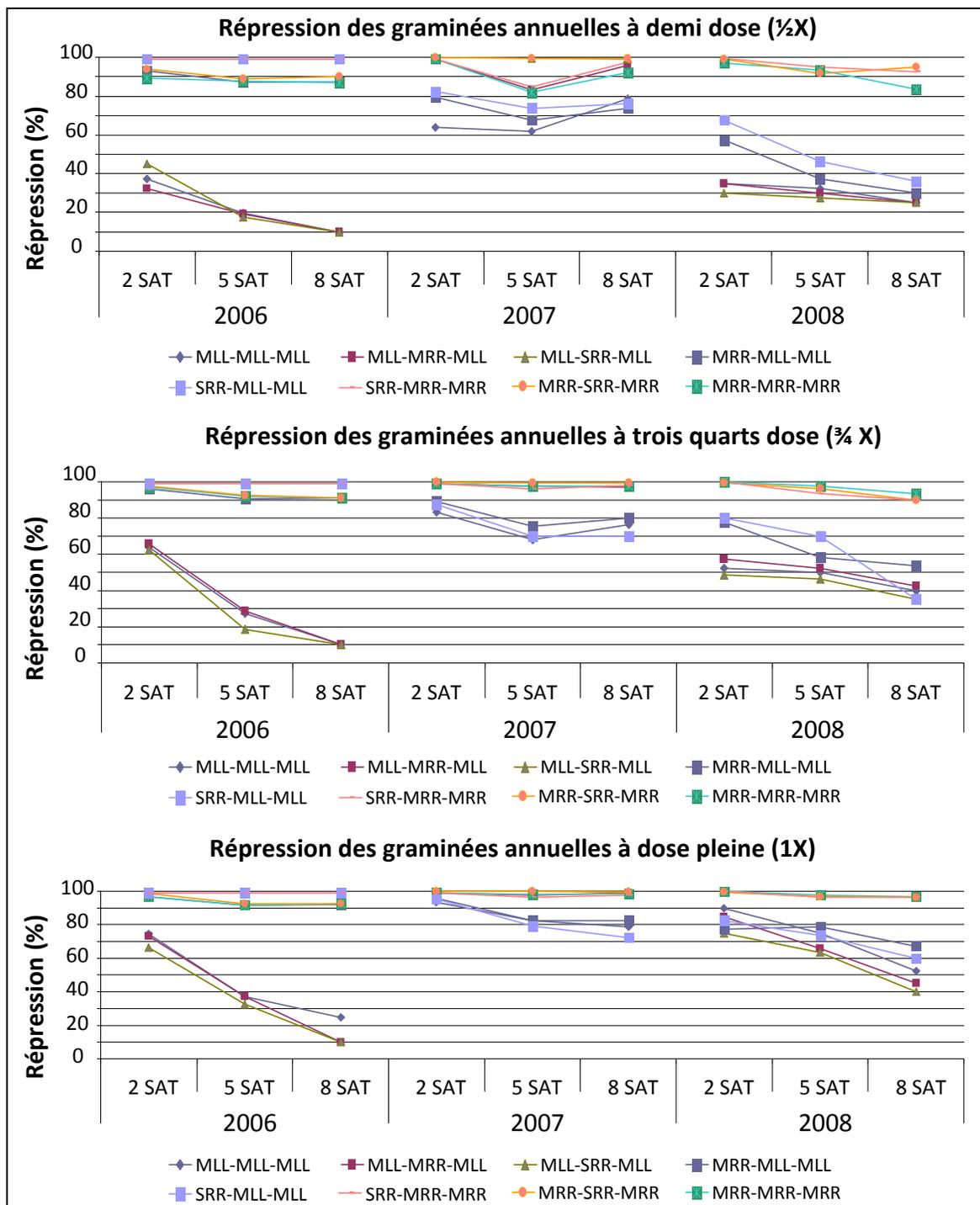
Hypothèse <sup>1</sup>	Contraste <i>a priori</i> <sup>1</sup>	2 SAT <sup>2</sup>			5 SAT			8 SAT					
		%	%	F	%	%	F	%	%	F			
<b>H1 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	97 <sup>3</sup>	vs 66	62.92	***	93	vs 51	64.97	***	93	vs 44	951.83	***
	MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	97	vs 85	6.09	*	93	vs 75	6.37	*	93	vs 73	71.11	***
	MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	97	vs 72	43.86	***	93	vs 57	53.84	***	93	vs 48	928.92	***
<b>H1 - B</b>	SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	88	vs 99	4.47	*	79	vs 96	4.98	*	72	vs 97	118.39	***
	MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	70	vs 99	51.04	***	56	vs 95	66.27	***	48	vs 95	1013.58	***
<b>H2 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	97	vs 99	0.09		93	vs 96	0.07		93	vs 97	1.67	
	MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	97	vs 99	0.04		93	vs 95	0.09		93	vs 95	0.57	
<b>H2 - B</b>	MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	85	vs 88	0.42		75	vs 79	0.32		73	vs 72	1.34	
	MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	72	vs 70	0.10		57	vs 56	0.26		48	vs 48	0.37	

<sup>1</sup> Voir Tableau 2-10 et Annexe 2.4

<sup>2</sup> SAT = Semaine après traitement

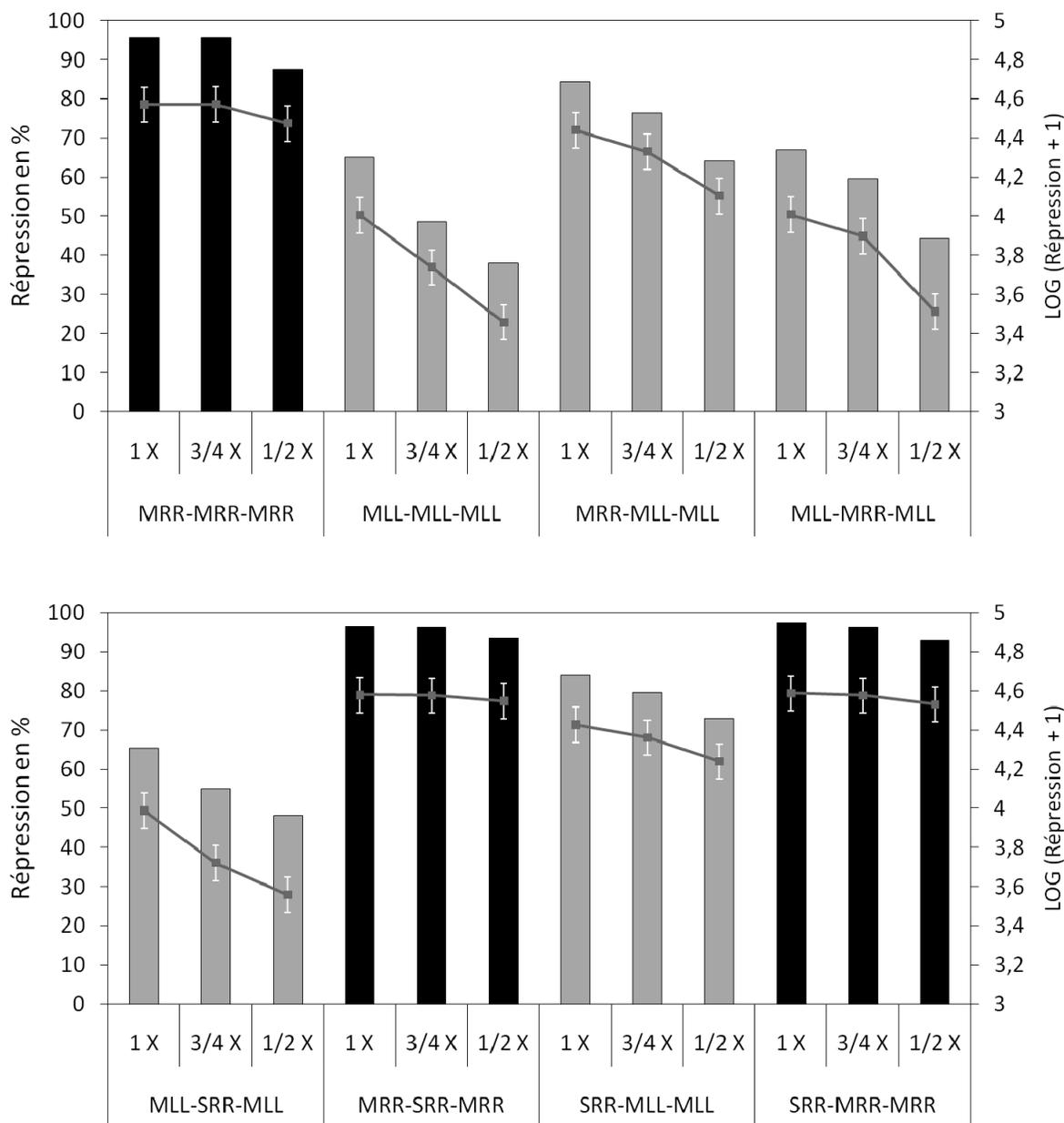
<sup>3</sup> Moyenne des trois doses d'herbicides ( $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1X), des trois années (2006, 2007 et 2008) et des quatre répétitions

\*, \*\*, \*\*\*, respectivement  $P \leq 0,05$ ,  $P \leq 0,01$  et  $P \leq 0,001$



**Figure 2-9** Pourcentage de répression des graminées annuelles à 2, 5 et 8 SAT dans les parcelles traitées chaque année à  $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1 X la dose d'herbicide pour les huit séquences culturales testées.

Chaque courbe représente une séquence définie par la culture et l'herbicide utilisés en 2006, 2007 et 2008. MRR = maïs Roundup Ready®, MLL = maïs Liberty Link® et SRR = soya Roundup Ready®.



**Figure 2-10** Pourcentage moyen de répression des graminées annuelles à 5 SAT dans les parcelles traitées à  $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1X la dose d'herbicide ; moyenne des trois années de la séquence culturale.

Chaque barre ( $\square$ ) représente le pourcentage moyen de répression (%) pour les trois années d'une séquence culturale. Les barres noires sont les séquences de référence (utilisation de glyphosate durant les trois années). Les erreurs types ( $\bar{\square}$ ) de chaque point des courbes ( $\text{---}$ ) permettent de comparer les doses à l'intérieur d'une même séquence culturale pour la variable transformée (LOG (Répression+1)).

## 2.4.2 La biomasse sèche aérienne des mauvaises herbes

### 2.4.2.1 Biomasse sèche des dicotylédones annuelles

La biomasse sèche des dicotylédones annuelles diffère selon la séquence culturale, la dose d'herbicide utilisée et l'année de culture (Annexe 2.15 et Figure 2-11). Les résultats suivent les mêmes tendances que ceux des répressions du chénopode et de l'herbe à poux. Les résultats indiquent que les biomasses de mauvaises herbes sont largement inférieures dans les parcelles traitées par rapport aux parcelles non traitées, peu importe la séquence culturale.

#### Séquences culturales

Les comparaisons de séquences culturales montrent des différences significatives suivant le choix de l'herbicide (Hypothèse H1, Tableau 2-15). Les différences entre les séquences sont faibles. Néanmoins comme pour les répressions, l'utilisation du glufosinate trois et deux années de suite apporte des différences significatives par rapport aux traitements de références (Figure 2-12). De même, l'utilisation du glyphosate entre deux années de glufosinate semble diminuer significativement la biomasse des dicotylédones (Hypothèse H1-A, Tableau 2-15). Les séquences où il y a alternance des deux cultures (maïs et soya) montrent les mêmes résultats (Hypothèse H1-B, Tableau 2-15).

#### Doses d'herbicide

La comparaison entre les doses d'herbicide indique des déviations par rapport aux résultats de répression, puisque les différences entre les doses réduites et la dose pleine sont significatives dans presque toutes les séquences culturales. Toutefois, les biomasses de mauvaises herbes résultant de la dose trois quarts sont au même niveau que celles de la dose pleine dans la séquence MRR-MRR-MRR, mais aussi dans la séquence MLL-MRR-MLL (Figure 2-12). Ce résultat confirme donc le potentiel de réduction de doses du glyphosate de la dose pleine à la dose trois-quarts. La demi-dose de glyphosate semble, malgré son niveau de biomasse sèche bas, déconseillée dans un contexte de forte infestation. L'étude de Sikkema et coll. (2004) montre des biomasses sèches de chénopode

non significativement différentes entre la demi-dose et la dose pleine de glyphosate. Il semble donc qu'en présence des deux dicotylédones de cette étude (i.e. *Chenopodium album* et *Ambrosia artemisiifolia*), ce constat ne soit pas applicable. Hormis la séquence MLL-MRR-MLL, toutes les séquences où le glufosinate intervient entraînent des biomasses sèches de dicotylédones significativement supérieures à doses réduites par rapport à la dose pleine. Ceci confirme les résultats de Chouinard (2004) qui notait des biomasses sèches des mêmes espèces très élevées sans réduction de dose.

### Cultures

Les contrastes a priori (Hypothèse H2, Tableau 2-15) indiquent que le choix de la culture dans la séquence n'influence pas le désherbage. Il n'y a aucune différence de répression des graminées annuelles entre une séquence qui utilisera du soya RR plutôt que du maïs RR.

**Tableau 2-15** Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance de la biomasse sèche des dicotylédones annuelles à 8 et 16 SAT.

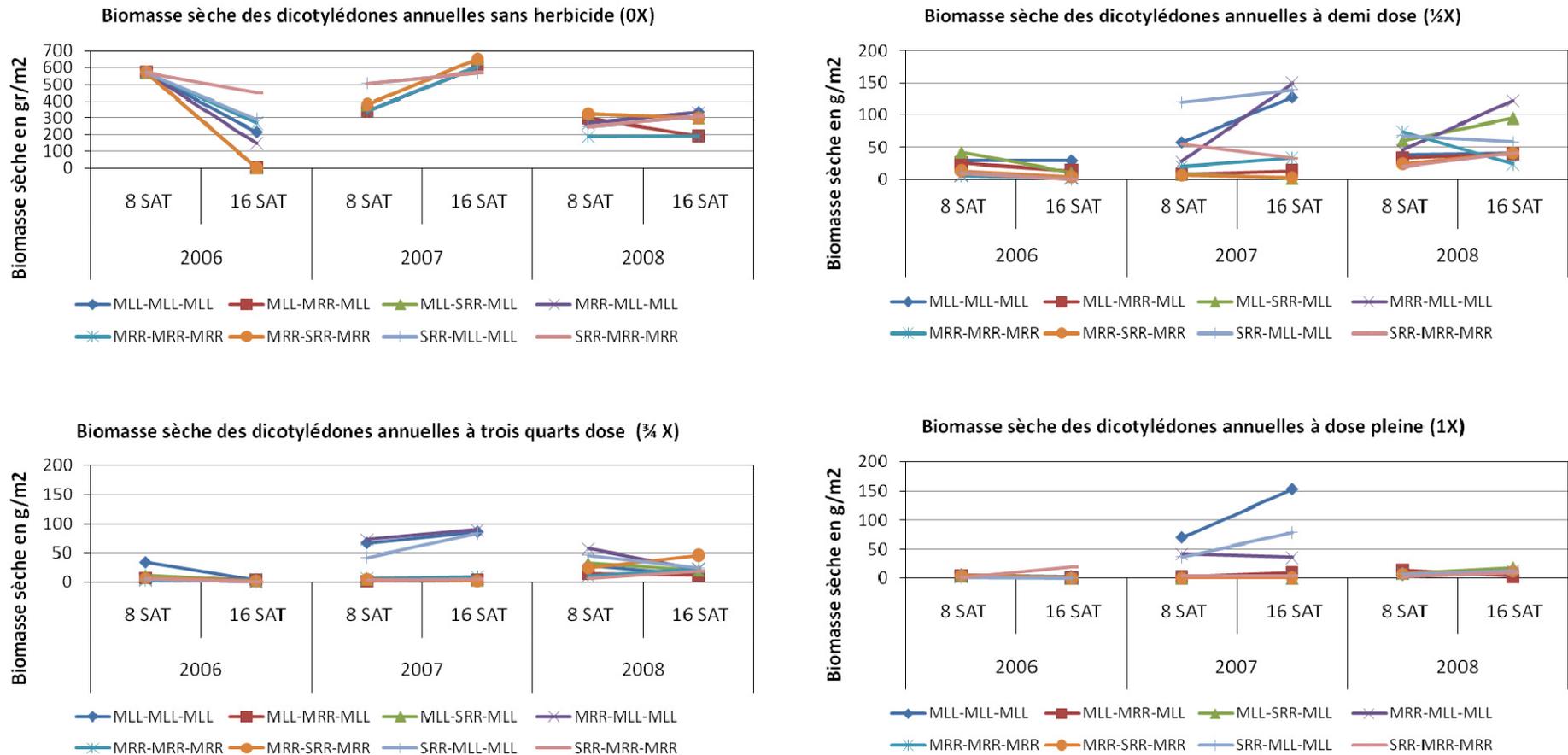
Hypothèse <sup>1</sup>	Contraste a priori <sup>1</sup>	8 SAT <sup>2</sup>			16 SAT		
		g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	F	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	F
H1 - A	MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	110 <sup>3</sup>	vs 126	30.59 ***	75	vs 135	6.28 *
	MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	110	vs 121	14.98 **	75	vs 127	3.73
	MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	110	vs 121	0.96	75	vs 92	1.75
H1 - B	SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	139	vs 119	15.29 **	131	vs 122	3.08
	MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	103	vs 156	0.54	98	vs 89	0.01
H2 - A	MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	110	vs 119	0.41	75	vs 122	0.02
	MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	110	vs 156	0.44	75	vs 89	0.81
H2 - B	MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	121	vs 139	0.36	127	vs 131	0.00
	MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	121	vs 103	0.18	92	vs 98	0.11

<sup>1</sup> Voir Tableau 2-10 et Annexe 2.4

<sup>2</sup> SAT = Semaine après traitement

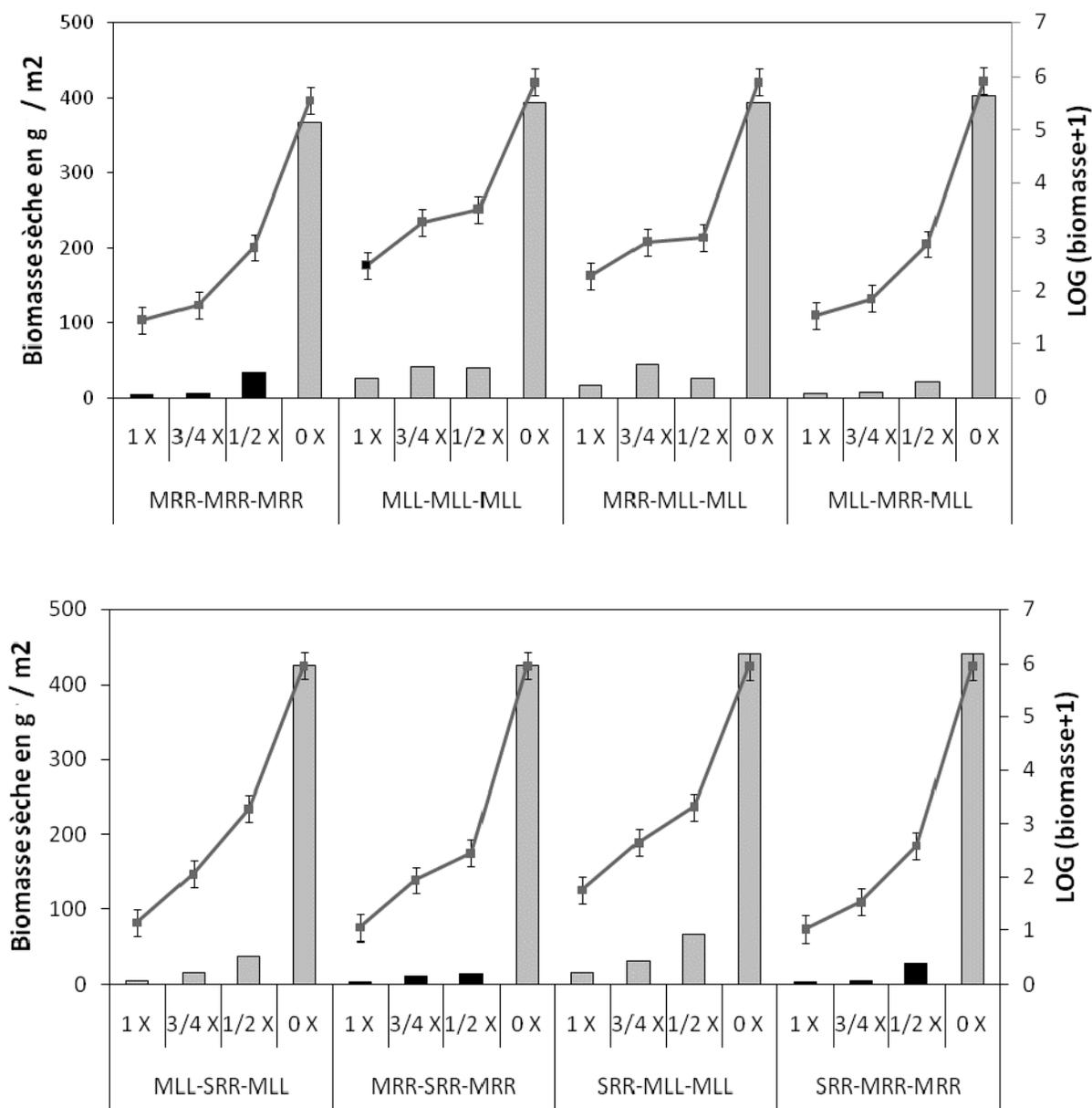
<sup>3</sup> Moyenne des quatre doses (0X, ½ X, ¾ X et 1X), des trois années (2006, 2007 et 2008) et des quatre répétitions

\*, \*\*, \*\*\*, respectivement P≤0,05, P≤0,01 et P≤0,001



**Figure 2-11** Biomasse sèche des dicotylédones annuelles à 8 et 16 SAT dans les parcelles non traitées et traitées chaque année à la dose ½ X, ¾ X et 1 X pour les huit séquences culturales testées (note : l'échelle des graphiques diffère entre la dose 0X et les parcelles traitées).

Chaque courbe représente une séquence définie par la culture et l'herbicide utilisés en 2006, 2007 et 2008. MRR = maïs Roundup Ready®, MLL = maïs Liberty Link® et SRR = soya Roundup Ready®.



**Figure 2-12** Biomasse sèche moyenne des dicotylédones annuelles à 8 SAT dans les parcelles traitées à la dose d'herbicide  $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1X et non traitées ; moyenne des trois années de la séquence culturale.

Chaque barre (■) représente le pourcentage moyen de répression (%) pour les trois années d'une séquence culturale. Les barres noires sont les séquences de référence (utilisation de glyphosate durant les trois années). Les erreurs types (±) de chaque point des courbes (—) permettent de comparer les doses à l'intérieur d'une même séquence culturale pour la variable transformée (LOG (Biomasse+1)).

#### **2.4.2.2 Biomasse sèche des graminées annuelles**

La biomasse sèche des graminées annuelles diffère selon la séquence culturale, la dose d'herbicide utilisée et l'année de culture (Annexe 2.16 et Figure 2-13). Les résultats suivent les mêmes tendances que les résultats de répression. Cependant, ces résultats montrent que les écarts entre les parcelles traitées et non traitées est plus faible que pour les dicotylédones annuelles. La présence des graminées est moins forte dans les parcelles non traitées car la compétition des dicotylédones au moment de leur levée est très élevée. Dans les parcelles traitées, l'éradication des dicotylédones par le traitement herbicide réduit la compétition inter-spécifique.

##### Séquences culturales

Les comparaisons de séquences culturales montrent des différences significatives suivant le choix de l'herbicide (Hypothèse H1, Tableau 2-16). Toutes les séquences qui utilisent du glufosinate que ce soit deux ou trois années, en alternance ou pas, ont des biomasses de graminées annuelles supérieures par rapport aux séquences de références recevant du glyphosate en continu (Hypothèse H1-A et B, Tableau 2-16). La séquence qui utilise le glufosinate durant trois années est définitivement à éviter s'il y a présence de graminées annuelles (Figure 2-14). Ces données confirment le faible potentiel du glufosinate à égaler le glyphosate pour lutter contre les graminées annuelles.

##### Doses d'herbicide

L'ensemble des parcelles traitées avec du glyphosate ont des biomasses de graminées annuelles très faibles (Figures 2-13 et 2-14) et ce quelque soit la dose utilisée sauf pour la monoculture de maïs où la demi-dose de glyphosate résulte en des biomasses sèches de graminées plus importantes qu'à la dose trois-quarts ou la dose pleine (Figure 2-14). Une recommandation de traitement à dose réduite pour le glyphosate semble donc possible en présence de graminées annuelles avec toutefois des précautions à demi-dose en monoculture de maïs. En ce qui concerne les séquences traitées avec les deux herbicides, on

constate que la demi-dose est systématiquement à éviter et la dose trois-quarts également sauf pour la séquence MLL-MRR-MLL.

### Cultures

Les contrastes a priori (Hypothèse H2, Tableau 2-16) indiquent que le choix de la culture dans la séquence n'influence pas le désherbage des graminées annuelles sauf dans deux cas où l'utilisation du soya RR est avantageuse. Toutefois, ces résultats ne sont pas confirmés par les deux mesures de biomasses à 8 et 16 SAT et doivent donc être interprétés avec précaution.

**Tableau 2-16** Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance de la biomasse sèche des graminées annuelles à 8 et 16 SAT.

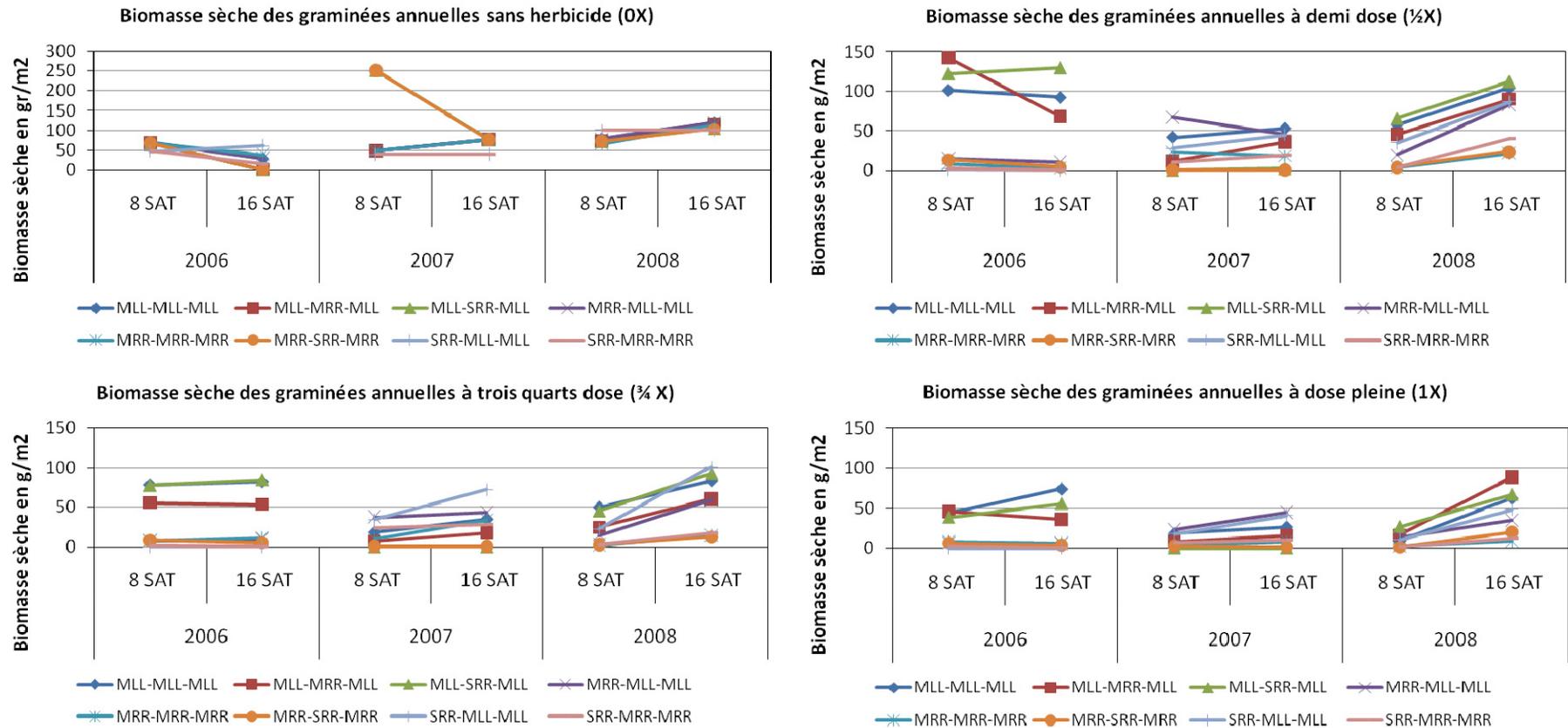
Hypothèse <sup>1</sup>	Contraste a priori <sup>1</sup>	8 SAT <sup>2</sup>			16 SAT						
		g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	F	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	F				
H1 - A	MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	45 <sup>3</sup>	vs	51	51.40	***	55	vs	70	29.45	***
	MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	45	vs	51	23.22	***	55	vs	47	7.13	*
	MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	45	vs	64	33.03	***	55	vs	60	10.07	**
H1 - B	SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	28	vs	20	9.88	**	50	vs	24	9.20	**
	MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	21	vs	36	31.29	***	29	vs	21	28.51	***
H2 - A	MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	45	vs	20	1.74		55	vs	24	2.75	
	MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	45	vs	36	1.93		55	vs	21	11.44	**
H2 - B	MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	51	vs	28	8.98	**	47	vs	50	1.68	
	MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	64	vs	21	2.38		60	vs	29	1.47	

<sup>1</sup> Voir Tableau 2-10 et Annexe 2.4

<sup>2</sup> SAT = Semaine après traitement

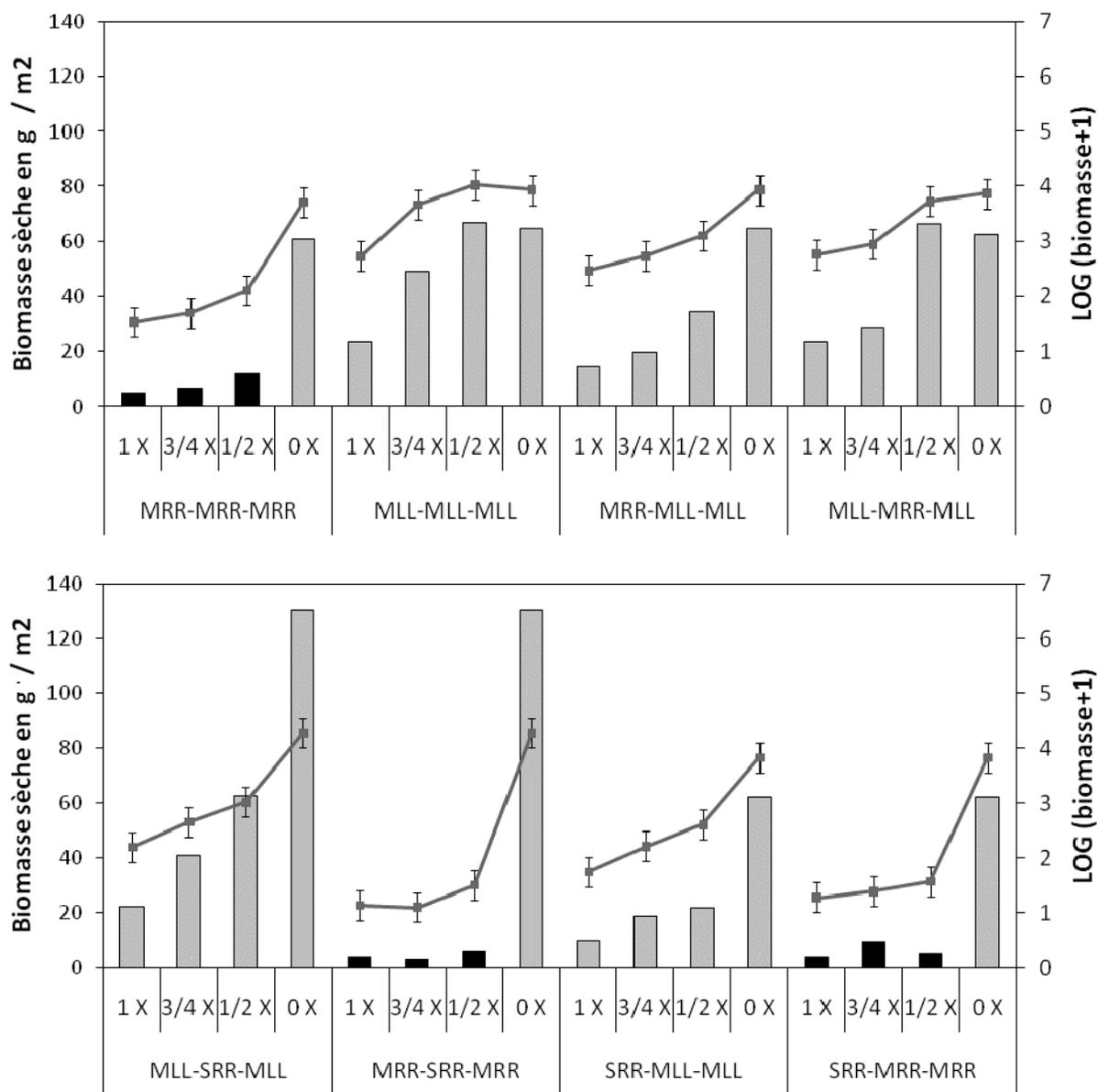
<sup>3</sup> Moyenne des quatre doses (0X, 1/2 X, 3/4 X et 1X), des trois années (2006, 2007 et 2008) et des quatre répétitions

\*, \*\*, \*\*\*, respectivement P≤0,05, P≤0,01 et P≤0,001



**Figure 2-13** Biomasse sèche des graminées annuelles à 8 et 16 SAT dans les parcelles non traitées et traitées chaque année à la dose ½ X, ¾ X et 1 X pour les huit séquences culturales testées (note : l'échelle des graphiques diffère entre la dose 0X et les parcelles traitées).

Chaque courbe représente une séquence définie par la culture et l'herbicide utilisés en 2006, 2007 et 2008. MRR = maïs Roundup Ready®, MLL = maïs Liberty Link® et SRR = soya Roundup Ready®.



**Figure 2-14** Biomasse sèche moyenne des graminées annuelles à 8 SAT dans les parcelles traitées à la dose d'herbicide  $\frac{1}{2}$  X,  $\frac{3}{4}$  X et 1X et non traitées ; moyenne des trois années de la séquence culturale.

Chaque barre ( $\square$ ) représente le pourcentage moyen de répression (%) pour les trois années d'une séquence culturale. Les barres noires sont les séquences de référence (utilisation de glyphosate durant les trois années). Les erreurs types ( $\pm$ ) de chaque point des courbes ( $\text{---}$ ) permettent de comparer les doses à l'intérieur d'une même séquence culturale pour la variable transformée (LOG (Biomasse+1)).

### 2.4.3 Rendement en grain des cultures

Le rendement relatif diffère selon la séquence culturale, la dose d'herbicide et l'année, sans interaction entre ces facteurs (Annexe 2.17). Les rendements relatifs réagissent moins fortement aux traitements de désherbage que la répression des mauvaises herbes ou les biomasses sèches. Les résultats détaillés par année montrent une grande différence entre les rendements de 2008 et ceux de 2006 et 2007 (Figures 2-15 et 2-16). Cela est dû à la gelée qui s'est produite au moment du remplissage des grains à l'automne 2008. Cet incident climatique a diminué de moitié les rendements du maïs comparativement à ceux de 2006 ou de 2007. De plus, les résultats de 2008 sont un peu hétérogènes, car les parcelles ne semblent pas toutes avoir été affectées au même degré par le gel. Malgré tout, les résultats restent parfaitement interprétables quand les données des trois années sont combinées (Figure 2-17).

#### Séquences culturales

Des différences significatives de rendement sont visibles entre les séquences culturales (Hypothèse H1, Tableau 2-17). On constate qu'en monoculture, toute séquence utilisant du glufosinate en alternance ou de façon répétée entraîne des baisses significatives de rendement par rapport à la séquence de référence. Globalement, on constate que l'emploi du glufosinate comparativement au glyphosate entraîne des baisses de rendement sur une séquence de trois ans (Figures 2-17). Ce résultat vient directement confirmer les problèmes de répression des mauvaises herbes engendrés par cet herbicide. En rotation de cultures, une différence apparaît uniquement lorsqu'on utilise le glyphosate en milieu de séquence (Hypothèse H2, Tableau 2-17). Ce dernier résultat est difficilement interprétable.

#### Doses d'herbicide

La comparaison entre les doses d'herbicide indique que le désherbage dans les séquences culturales où le glyphosate est utilisé à la dose trois-quarts n'entraîne pas de perte significative de rendement comparativement à la dose pleine (Figure 2-17). Il y a des différences de rendements plus importantes, en particulier en monoculture de maïs, lorsque la demi-dose est utilisée. En ce qui concerne les séquences culturales employant les deux

herbicides à la dose trois-quarts, on constate que les rendements diffèrent parfois ou sont similaires à ceux enregistrés avec la dose pleine. L'emploi de la demi-dose entraîne des baisses significatives de rendements dans chaque cas en comparaison à la dose pleine (Figure 2-17). Le même résultat est obtenu pour la séquence qui emploie du glufosinate pendant trois années de suite.

### Cultures

Il n'y a aucune différence de rendements entre une séquence qui utilisera ou non du soya RR, indiquant qu'il n'y a pas d'effet de la culture dans la séquence sur le rendement relatif (Hypothèse H2, Tableau 2-17).

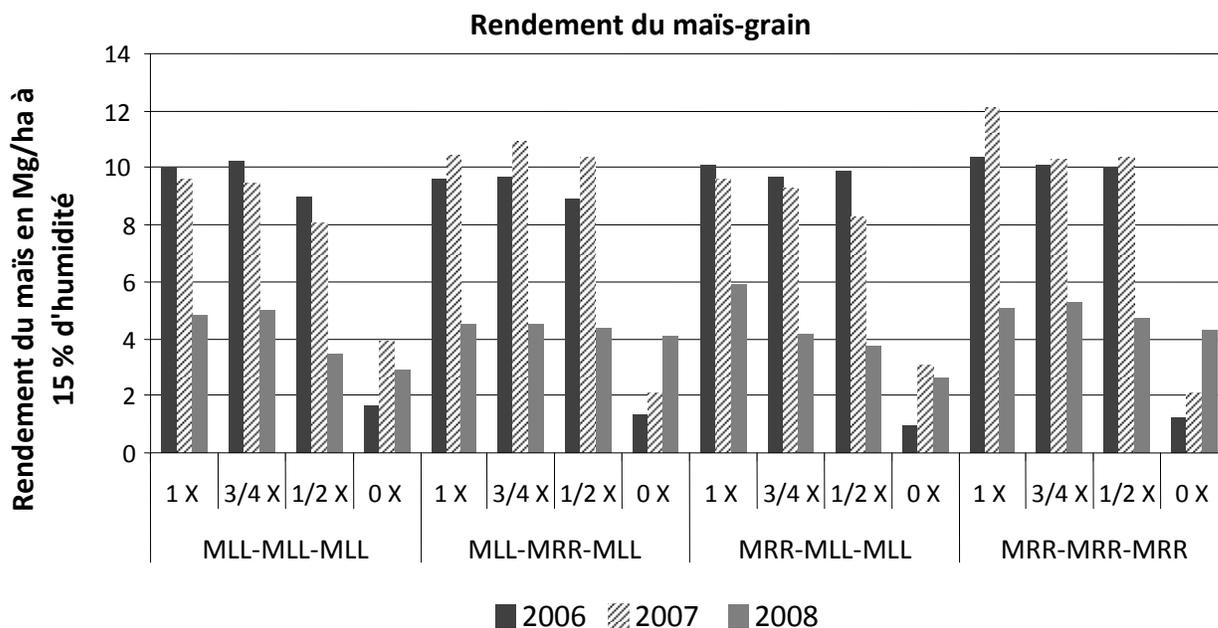
**Tableau 2-17** Hypothèses de recherche, valeurs moyennes des contrastes a priori et valeurs de Fisher pour l'analyse de variance des rendements relatifs.

Hypothèse <sup>1</sup>	Contraste <i>a priori</i> <sup>1</sup>	Récolte			
		%	vs	%	F
<b>H1 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	70 <sup>2</sup>	vs	68	4.68 *
	MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	70	vs	68	6.88 *
	MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	70	vs	72	5.31 *
<b>H1 - B</b>	SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	73	vs	76	0.90
	MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	77	vs	81	6.51 *
<b>H2 - A</b>	MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	70	vs	76	0.10
	MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	70	vs	81	0.65
<b>H2 - B</b>	MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	68	vs	73	1.84
	MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	72	vs	77	0.34

<sup>1</sup> Voir Tableau 2-10 et Annexe 2.4

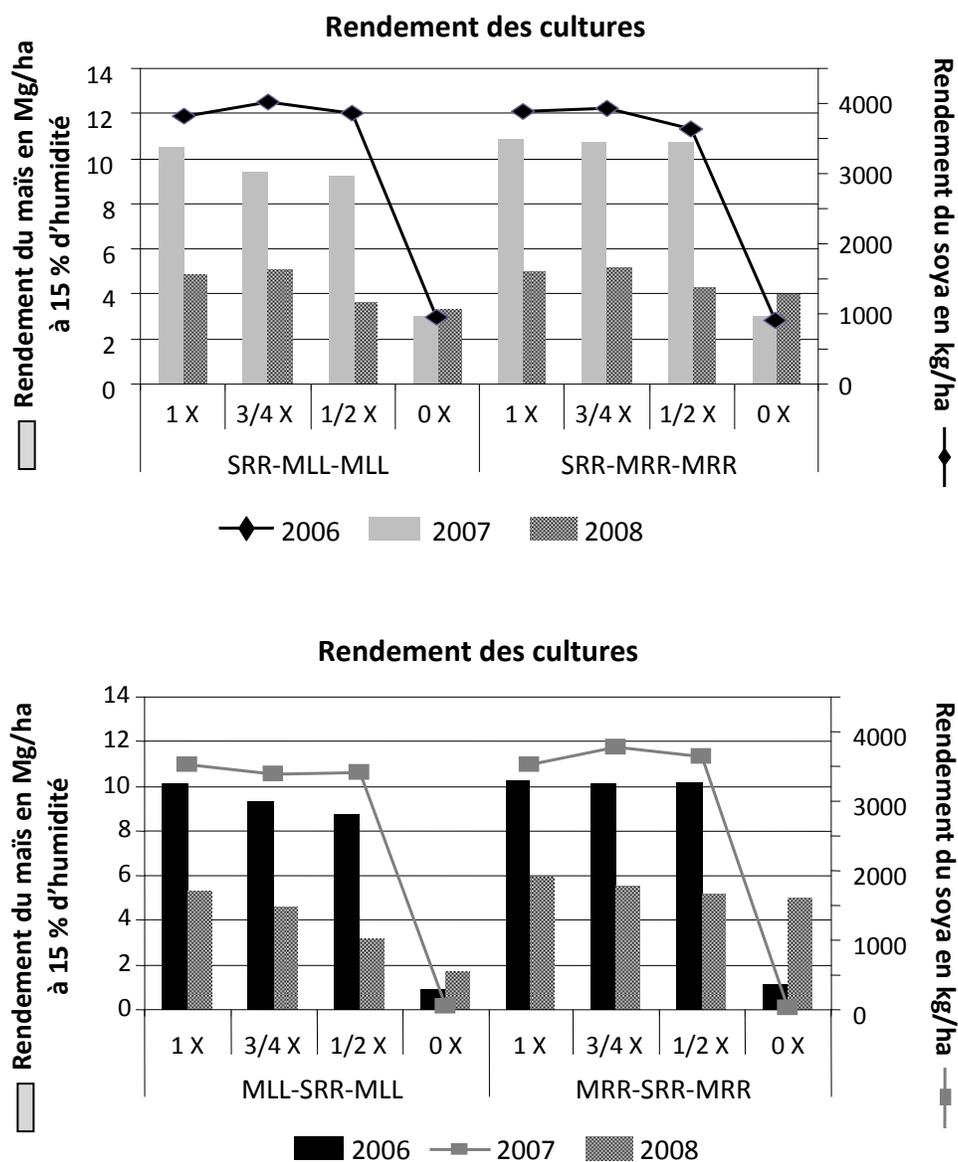
<sup>2</sup> Moyenne des quatre doses (0X, ½ X, ¾ X et 1X), des trois années (2006, 2007 et 2008) et des quatre répétitions

\*, \*\*, \*\*\*, respectivement P≤0,05, P≤0,01 et P≤0,001



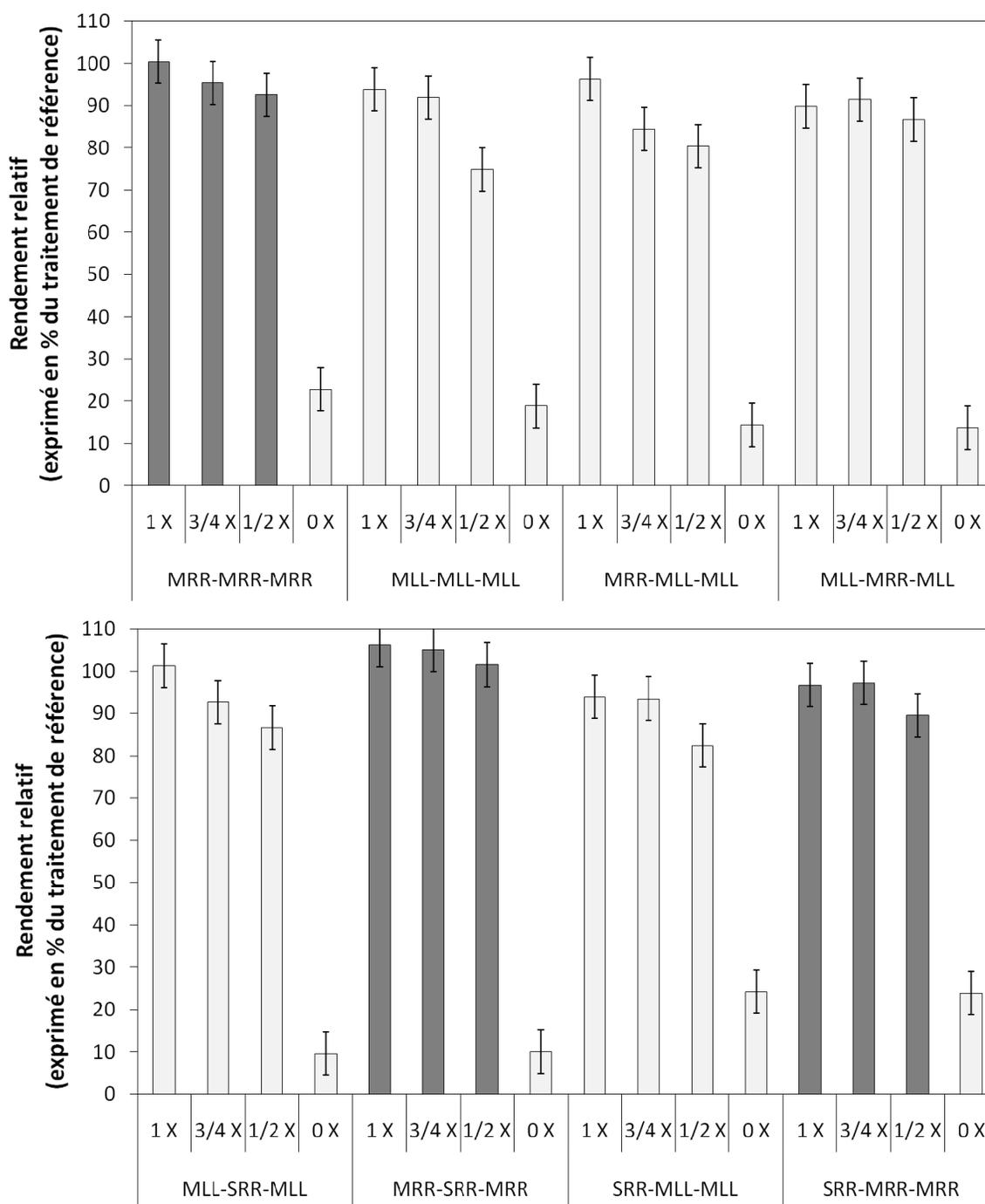
**Figure 2-15** Rendement en grain (Mg/ha) dans les parcelles en monoculture de maïs traité chaque année à la dose d'herbicide 0 X, 1/2 X, 3/4 X et 1 X.

Les histogrammes (▨) représentent le rendement du maïs en Mg/ha. MRR = maïs Roundup Ready®, MLL = maïs Liberty Link®.



**Figure 2-16** Rendement en grain du maïs (Mg/ha) et du soya (kg/ha) pour les séquences culturales en rotation maïs/soya traitées chaque année à 0 X, 1/2 X, 3/4 X et 1 X la dose d'herbicide.

Les histogrammes (□) représentent le rendement du maïs en (Mg/ha) et les courbes (—■) représentent le rendement du soya (kg/ha). MRR = maïs Roundup Ready®, MLL = maïs Liberty Link® et SRR = soya Roundup Ready®.



**Figure 2-17** Rendement relatif moyen de chaque séquence culturale, exprimé en % du traitement de référence, pour les doses d'herbicide 0 X, 1/2 X, 3/4 X et 1 X.

Chaque barre représente la moyenne des trois années d'une séquence culturale donnée. Les barres grises (□) représentent les séquences de référence utilisant le glyphosate durant trois années de suite. Les erreurs types (I) permettent de comparer les doses à l'intérieur d'une même séquence culturale. (Données non transformées).

## 2.5 Conclusion et discussion

Les résultats des trois saisons de croissance de cette étude permettent de tirer des conclusions quant à l'utilisation de doses réduites de glyphosate ou de glufosinate pour le désherbage des mauvaises herbes annuelles dans le maïs et le soya.

Premièrement, la séquence culturale de référence maïs/glyphosate durant trois années (MRR-MRR-MRR) a été supérieure aux autres grâce à une répression supérieure des mauvaises herbes, des biomasses sèches de mauvaises herbes moindres et des rendements supérieurs comparativement à des séquences combinant l'utilisation du glufosinate. Cette séquence démontre comment cette technologie a permis la simplification du désherbage grâce aux cultures tolérantes aux herbicides (Gianessi 2008). À l'heure actuelle, c'est la séquence culturale la plus utilisée par les producteurs agricoles et nos résultats confirment son attrait, à doses réduites ou non. Toutefois, en devenant une base dominante de la gestion des mauvaises herbes, l'utilisation du glyphosate en continu dans le maïs et le soya deviendra problématique (Beckie 2006) au Québec, comme c'est déjà le cas dans d'autres régions du monde (Tardif 2005). Cette pratique va à l'encontre d'un système cultural diversifié et représente un abandon de toute stratégie de gestion de la résistance (Young 2006). Une alternative au glyphosate doit donc être proposée (Duke & Powles 2008a).

Cette alternative ne pourra pas venir de l'utilisation unique du glufosinate (MLL-MLL-MLL), à doses pleine ou réduites, car cette séquence culturale démontre un manque d'efficacité flagrant, particulièrement contre les graminées annuelles causant une augmentation de la biomasse sèche des mauvaises herbes et une baisse des rendements. Cette constatation fait écho avec les résultats déjà mentionnés dans les précédentes études, qui ne recommandaient pas le glufosinate en application unique à dose pleine (Hamill et coll. 2000; Chouinard 2004). L'utilisation durant deux années de suite du glufosinate est aussi à éviter pour les mêmes raisons, même si les indicateurs de performance ci-haut nommés sont moins défavorables. La première hypothèse de cette étude est donc infirmée à cause du manque de répression et des pertes de rendements observées dans les séquences utilisant le glufosinate. Toutefois, il semble que la séquence culturale avec le meilleur compromis (i.e. entraînant le moins de pertes de rendement) soit la séquence culturale

MLL-MRR-MLL. Premièrement, elle représente un intérêt réel pour prévenir la résistance des mauvaises herbes au glyphosate grâce à l'alternance des modes d'action des deux herbicides (Tardif 2005). Deuxièmement, la répression des dicotylédones annuelles fut très adéquate et malgré la répression inadéquate des graminées annuelles, cette séquence présente un bon potentiel de réduction de doses comme le montrent les rendements relatifs.

Dans les séquences où le maïs LL est répété deux années de suite, le remplacement du maïs RR par le soya RR ne change rien. Cette remarque est valable dans toutes les autres séquences culturales utilisant le soya RR. La seconde hypothèse de cette étude est donc confirmée. Le remplacement d'un maïs traité au glyphosate par un soya traité avec ce même herbicide n'entraîne pas de différences significatives quelle que soit la variable étudiée.

Le manque d'efficacité du glufosinate s'explique en partie par son mode d'action. Ce dernier possède une systémie très faible et affecte faiblement les mauvaises herbes au stade plantule (faible surface de contact). Ce fut le cas dans cette étude pour les graminées annuelles. Au moment du traitement ces dernières étaient au stade plantule (Annexe 2.6) et la surface de contact des feuilles est alors très faible en comparaison avec celles des dicotylédones annuelles. Aussi, ces dernières étaient souvent à un stade déjà avancé et leurs feuilles ont pu provoquer un effet « parapluie » sur les graminées fraîchement levées. L'application d'un herbicide résiduel en mélange avec le glufosinate est, dans ce cas, pleinement justifiée car elle aurait permis une meilleure protection durant la période critique de compétition entre la culture et les mauvaises herbes. Parallèlement, le glyphosate et sa forte systémie jusqu'aux racines ont permis de faire la différence sur la répression et la biomasse des mauvaises herbes et en particulier celle des graminées annuelles. Le positionnement du traitement est un élément clé dans cette étude où un traitement unique avait été choisi. Dans la majorité des cas, les producteurs constatent des baisses de rendements lorsque l'application est tardive et que les densités de mauvaises herbes sont fortes au début de la saison de croissance de la culture (Dalley et coll. 2004). Dans cette étude, le moment de l'application de l'herbicide a été choisi en fonction, d'une part du stade de la culture, et d'autre part de la pression des mauvaises herbes. La flore

mixte présente sur le site expérimental a donc fortement pénalisé le glufosinate et son mode d'action en est la principale raison.

Cependant, en présence uniquement d'herbe à poux, les résultats observés montrent toutefois un potentiel de remplacement efficace du glyphosate par le glufosinate. Les deux herbicides ont permis une excellente répression pendant les trois années de cette étude. Un site infesté avec uniquement cette espèce serait nécessaire pour confirmer ces résultats.

Concernant la réduction de doses, les deux herbicides pourraient s'y prêter uniquement sous certaines conditions et à la dose trois-quarts uniquement. Premièrement, il existe un risque important de baisse de répression des mauvaises herbes en dessous de cette dose. Deuxièmement, la demi-dose ne procure jamais des rendements aussi élevés que la dose pleine. La dose trois-quarts semble pour ces mêmes raisons plus appropriée. Malgré cela, l'utilisation de glufosinate à la dose trois quarts n'est pas recommandable si la parcelle présente des risques élevés d'infestations de graminées annuelles. Ces résultats complètent les études ayant démontré la possibilité de réduire les doses de glyphosate de moitié en présence d'une seule espèce dominante de mauvaise herbe (Sikkema et coll. 2005; Sikkema et coll. 2004). En présence d'une flore mixte, les résultats de cette étude démontrent les problèmes de biomasses et de baisses de rendements qu'entraîne la demi-dose de glyphosate. Au bout de trois ans, l'analyse statistique montre quasi systématiquement un effet très important du facteur année sur les variables dépendantes. L'emploi de doses réduites est donc très dépendant des conditions de l'année en cours. Or le sujet est encore plus complexe (il dépend aussi de la flore présente et de l'herbicide utilisé) et il convient de traiter au cas par cas suivant l'historique de chaque champ et de l'importance de l'infestation durant l'année en cours.

À la lumière de ce chapitre, le glyphosate semble le seul herbicide qui peut se prêter à une réduction de dose grâce à sa grande efficacité et sa grande souplesse d'utilisation. La séquence culturale qui ressort en lien avec les objectifs initiaux est pour l'instant : MLL-MRR-MLL avec une utilisation possible de la dose trois-quarts sauf si un problème élevé de graminées annuelles est présent. L'étude de la banque de graines au chapitre trois permettra de confirmer ou non ces premières conclusions.

## 2.6 Références bibliographiques

- ALTA Inc.**, 2007. Image satellite de l'essai. Google maps. [En ligne] : <http://maps.google.com/maps?ll=46.727964,-71.501964&z=19&t=h&hl=fr> [Accédé le 30 mars 2009].
- Anonyme, 2009a.** Herbicide Liberty 200 SN . BAYER CROPSCIENCE INC. [En ligne] : <http://fr.bayercropscience.ca/Products/Herbicides/Liberty-200.aspx> [Accédé le 6 mars 2009].
- Anonyme, 2009b.** Herbicide Roundup WeatherMax. MONSANTO CANADA INC. [En ligne] : [http://www.monsanto.ca/\\_pdfs/labels\\_msds/ru\\_wmax\\_label\\_french.pdf](http://www.monsanto.ca/_pdfs/labels_msds/ru_wmax_label_french.pdf) [Accédé le 30 janvier 2009].
- Blackshaw, R.E., O'Donovan, J. T., Harker, K. N., Clayton, G. W., & Stougaard R.N.**, 2006. Reduced herbicide doses in field crops: A review. *Weed Biology and Management*, 6, 10-17.
- Chouinard, N.**, 2004. Comparaison de systèmes de désherbage dans le maïs et le soya tolérants aux herbicides avec un système de désherbage conventionnel. Mémoire de maîtrise. Université Laval.
- Douglass, L.**, 2004. Analysis of repeated measures design. [En ligne] : <http://ansc.umd.edu/wwwfaculty/Douglass/home03.html>. [Accédé le 30 mars 2008].
- Gianessi, L.P.**, 2008. Economic impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, 64(4), 346-352.
- Hamill, A.S., Knezevic, S.Z., Chandler, K., Sikkema, P.H., Tardif, F.J., Shrestha, A. & Swanton, C.J.**, 2000. Weed control in glufosinate-resistant corn (*Zea mays*). *Weed Technology*, 14(3), 578-585.
- Piepho, H.P., Bachse, A. & Richter, C.**, 2004. A mixed modelling approach for randomized experiments with repeated measures. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 190, 230-247.
- Rahman, A., James, T.K. & Grbavac, N.**, 2006. Correlation between the soil seed bank and weed populations in maize fields. *Weed Biology and Management*, 6, 228-234.

**Sikkema, P.H., Shropshire, C., Hamill, A.S., Weaver, S.E., & Paul B. Cavers, P.B.,** 2005. Response of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) to glyphosate application timing and rate in glyphosate-resistant corn (*Zea mays*). *Weed Technology*, 19(4), 830-837 .

**Sikkema, P.H., Shropshire, C., Hamill, A.S., Weaver, S.E., & Paul B. Cavers, P.B.,** 2004. Response of Common Lambsquarters (*Chenopodium album*) to Glyphosate Application Timing and Rate in Glyphosate-Resistant Corn. *Weed Technology*, 18(4), 908-916.

**Tardif, F.J.,** 2005. Selection of herbicide resistance in weeds: the influence of herbicide-resistant crops. The first decade of herbicide-resistant crops in Canada. *Topics in Canadian Weed Science*. Niagara Falls, ON: Robert H. Gulden and Clarence J. Swanton, pp. 43-50.

### **3. Étude de doses réduites de glyphosate et de glufosinate d'ammonium dans diverses séquences de maïs et de soya : impact sur la banque de semences de mauvaises herbes**

#### **3.1 Résumé**

L'étude de la banque de graines de mauvaises herbes apporte une donnée supplémentaire pour comprendre les effets de l'utilisation de doses réduites d'herbicide. La quantification de la banque de graines s'est faite à l'aide d'une méthode mixte combinant la séparation du sol et le décompte des émergences. Cette méthode n'avait jamais été utilisée pour le décompte de mauvaises herbes. La première étape fut la prise des échantillons dans les parcelles expérimentales du site de St-Augustin-de-Desmaures et leur mise au froid pendant une période de 3 mois. La deuxième étape consista à réduire de manière très importante le volume des échantillons de sol, le but étant d'obtenir un échantillon réduit de 50 à 80% de son volume initial. Cette étape permit la concentration des graines de mauvaises herbes dans une fine couche de sol, qui fut mise en germination sur un substrat de silice et terreau. Après réduction, les échantillons furent mis en germination pour une période totale de 12 à 14 semaines, avec un retournement du sol au milieu de cette période. Pour évaluer l'efficacité de la méthode, les échantillons ont été une nouvelle fois tamisés et un test de viabilité a été mené sur les graines qui n'avaient pas germé. La méthode a permis en un seul grand cycle de germination de voir lever environ 83% des graines viables de l'ensemble des espèces présentes. Les résultats montrent que le nombre de graines a surtout évolué en fonction de la dose utilisée au fil des deux premières années des séquences. On constate que d'un point de vue global l'utilisation deux années répétées de doses réduites semble augmenter de façon significative la banque de graines totale présente dans le sol, en comparaison avec la dose homologuée des herbicides. L'effet des séquences reste pour l'instant trop peu important pour privilégier ou non une stratégie à base de glyphosate ou de glufosinate, même si la tendance semble toutefois avantager l'utilisation deux années de suite du glyphosate.

## 3.2 Introduction

La banque de graines de mauvaises herbes est grandement influencée par l'historique des rotations et les pratiques culturales mises en place sur la parcelle (Brenchley & Warington 1933). La réduction ou l'augmentation de la densité de la banque de graines peut entraîner le succès ou la faillite de méthodes culturales bénéfiques pour l'environnement. Cela peut être le cas pour les cultures conduites en agriculture biologique ou encore en lutte intégrée. L'utilisation d'herbicides à dose homologuée permet généralement le contrôle le plus exhaustif possible des mauvaises herbes présentes et par conséquent permet une stabilisation potentielle de la banque de graines. Par opposition l'utilisation de doses réduites ne garantit pas des résultats similaires et le fabricant n'apporte aucune sécurité quant à cette utilisation (Thibault 2006). À ce jour, peu d'études ont étudié l'effet des doses réduites de glyphosate et de glufosinate sur la banque de graines. Sikkema et al. (2004) rapportent que l'utilisation des doses égales ou supérieures à 450 kg a.i. /ha de glyphosate (la demi-dose de cette étude) n'entraîne pas d'augmentation significative des levées de chénopode blanc (*Chenopodium album*) l'année suivante. Les mêmes chercheurs arrivent aux mêmes conclusions en 2005, pour le pied de coq (*Echinochloa crus-galli*).

Le but du présent chapitre est d'évaluer l'effet sur la banque de graines de doses réduites de glyphosate et de glufosinate après deux années d'utilisation, à l'aide d'une méthode requérant moins de ressources et de temps que les méthodes utilisées habituellement.

L'objectif final est d'obtenir un dénombrement le plus exhaustif possible des espèces présentes sur le site expérimental avant le début de l'expérience en 2006 et après deux années de rotations en 2007.

Deux hypothèses sont examinées.

1. La méthode mixte d'évaluation de la banque de graines (Heerd et coll. 1996) permettra de dénombrer en moyenne, au moins 80% des graines de mauvaises herbes viables.

2. Les doses demi et trois quarts de glyphosate et de glufosinate utilisées pendant deux années consécutives n'augmenteront pas la banque de graines.

### **3.3 Méthodologie expérimentale**

#### **3.3.1 Essai préliminaire**

Une étude préliminaire réalisée à l'hiver 2007 nous a permis de tester la méthode de mise en germination directe des échantillons de sol en serre après un passage au froid (4°C) de 3 mois. Ce type de dispositif a montré plusieurs limites à commencer par le réglage des températures. La serre étant occupée par d'autres expériences des fluctuations de températures auraient été inappropriées. De plus chauffer une serre à des températures de 35°C et plus représente des coûts importants, surtout en hiver. Le deuxième problème important a été l'épaisseur de la couche de sol dans les pots, car supérieure à 3 cm. Il aurait donc fallu mélanger l'échantillon plusieurs fois sur une longue période pour obtenir un comptage le plus proche possible du nombre total de graines viables. Ces deux principales limites étaient suffisamment pénalisantes pour adopter une autre stratégie.

#### **3.3.2 Justification de l'utilisation d'une méthode mixte en chambre de croissance**

Une méthode de séparation des graines utilisée seule ne nous aurait pas donné une information suffisamment précise du nombre de graines viables pour plusieurs raisons. Premièrement, la méthode de séparation des semences par flottaison présente un risque sur la viabilité des graines et les taux de graines viables sont très importants dans un contexte de gestion des mauvaises herbes. Deuxièmement, les méthodes d'élutriation demandent un matériel adapté. La construction de machine de lavage nous était impossible vu le temps et les moyens à notre disposition. Le lavage de l'échantillon dans un sac de nylon a été également écarté, car il ne permet pas une séparation multiple (par opposition à plusieurs tamis superposés) des graines les plus grosses par rapport aux plus petites. Enfin, la technique du tamisage comme unique technique reste impossible vu la diversité de petites graines à retrouver dans les échantillons.

L'étape de la recherche manuelle des graines représente un travail laborieux et souvent imprécis, notamment pour la recherche de petites graines. Le nombre relativement

important (160) d'échantillons de cette expérience représentait donc un défi de patience sans pour autant arriver à un résultat précis. Rappelons que cette expérience utilise des parcelles témoins enherbés et que la densité de graines dans le sol de ces parcelles risque d'être très élevée.

À la vue de toutes les méthodes citées précédemment et de l'essai préliminaire, un choix s'est donc porté sur une méthode proche de la méthode mixte de Heerdt et coll. (1996). Malgré l'excellent taux de levée que semblait procurer cette nouvelle méthode, il a été décidé de procéder à certains changements dont le plus important fut la serre. La température ne pouvait être élevée au-dessus des 25 degrés Celsius pendant une longue période, privant par la même occasion la germination de certaines espèces qui demandent des pics de températures supérieurs à 35 degrés Celsius. Toutes ces raisons ont amené à mettre en place cette étude dans des chambres de croissance, qui présentaient l'avantage du réglage précis de la température, du type et de la durée de l'éclairage. Le but étant de faire aussi bien, voire d'augmenter encore plus le pourcentage de germination des graines de mauvaises herbes viables. Le deuxième changement concerne la quantification des graines qui n'ont pas germé. Un test de viabilité au sel de tétrazolium a été utilisé plutôt qu'une simple observation visuelle de l'intérieur des graines. Le but de ce changement était d'accroître la précision du taux de graines qui n'ont pas germé.

### **3.3.3 Échantillonnage et prélèvement de sol**

Deux questions importantes sont posées lors de l'échantillonnage d'une banque de graines de mauvaises herbes : le nombre d'échantillons à prendre par parcelle et la taille de chaque échantillon (Rahman et coll. 2001). De plus, la distribution spatiale des mauvaises herbes est plus ou moins hétérogène suivant les parcelles et les espèces présentes. Enfin, la période de prélèvement est aussi à considérer.

Des études spécifiques à ce domaine de recherche ont été effectuées pour répondre à ces questions. Bigwood et Inouye (1988) ont démontré la nécessité de prélever un plus grand nombre de petits échantillons plutôt qu'un petit nombre de grands échantillons. Il préconise également la division des grandes parcelles en plusieurs parties plus petites. Ces résultats sont en accord avec ceux de Rahman et coll. qui précise que ce type d'échantillonnage diminue le risque d'erreur lié à la variabilité spatiale des mauvaises herbes (Rahman et coll.

2001). Ambrosio et al. (2004) privilégient même un patron de prélèvement basé sur une grille plutôt qu'un prélèvement aléatoire.

En ce qui concerne le nombre de prélèvements, Rahman et al. (2001) recommandent que le nombre soit un compromis entre les limitations pratiques de l'expérience et le degré de précision requis. De plus, cette même étude préconise le prélèvement des échantillons à la fin de la période de culture et avant le travail du sol. Le labour par exemple entraîne des déplacements significatifs de graines vers des profils de sol plus profond (Rahman et coll. 2001).

À la lecture de ces recommandations, un prélèvement de 10 carottes de sol (2,1 cm de diamètre et 15 cm de profondeur) a été adopté pour représenter chaque sous-parcelle (4,5 x 6 m). Ce nombre d'échantillons paraissait suffisamment précis pour représenter la plus petite unité expérimentale.

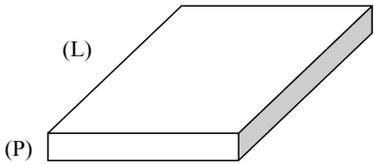
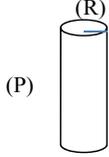
Le prélèvement a été fait suivant une grille à l'intérieur des sous-parcelles pour limiter l'erreur liée à la distribution spatiale des mauvaises herbes d'une part, mais aussi pour prélever en dehors des quadrats de biomasse (Figure 3-2). Enfin, le prélèvement s'effectua les jours suivants la récolte et avant le labour d'automne.

### **3.3.4 Protocole et dispositif expérimental**

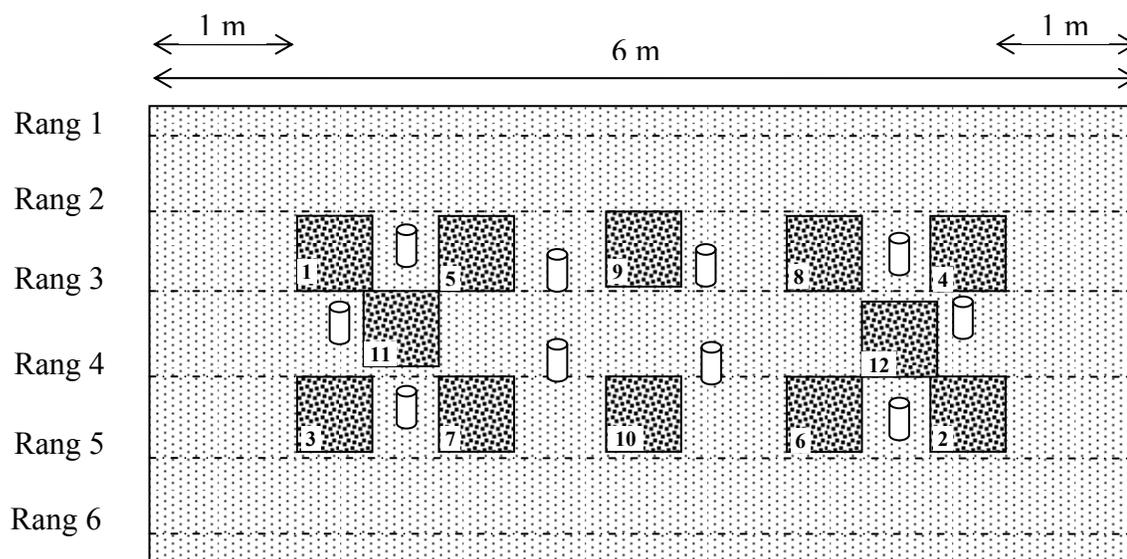
#### **3.3.4.1 Le prélèvement et stockage au froid**

Afin de quantifier l'évolution de la banque de graines, deux prélèvements ont été effectués. Le premier a été réalisé pendant la première saison de croissance des cultures (maïs et soya), le 5 juillet 2006. Un seul prélèvement (composé de 10 carottes de sol) par grande parcelle a été effectué afin d'évaluer la composition de la banque de graines avant l'expérience (prélèvement aléatoire). Ce prélèvement représente 0,01% du volume total de la parcelle (à 15cm de profondeur; Figure 3-1). En 2007, un deuxième prélèvement (composé de 10 carottes de sol) a été effectué en postrécolte le 27 octobre, dans chaque sous-parcelle. Les échantillons de sol ainsi prélevés indiquent l'évolution de la banque de graines après deux années de rotation et d'utilisation de doses réduites d'herbicides. Enfin, un troisième prélèvement fut effectué en postrécolte en 2008, à la fin des trois années de rotation. Les résultats de ce troisième prélèvement ne seront pas présentés dans ce mémoire

puisque les échantillons ne sont pas encore évalués. Le plan de prélèvement de ces deux années est présenté dans la figure 3-2.

Volume parcelle expérimentale ( $V_1$ )	Volume prélèvement de sol ( $V_2$ )	Volume des 10 prélèvements de sol par rapport au volume de la parcelle ( $V_3$ )
 <p>(L) (l) (P)</p> <p><math>(V_1) = 6\text{m (L)} \times 4,5\text{m (l)} \times 0,15\text{m (P)}</math>  <math>(V_1) = 4,05\text{m}^3</math>  <math>(V_1) = 4\,050\,000\text{ cm}^3</math></p>	 <p>(R) (P)</p> <p><math>(V_2) = \pi \times 0,0105^2\text{m (R)} \times 0,15\text{m (P)}</math>  <math>(V_2) = 0,00005195\text{ m}^3</math>  <math>(V_2) = 51,95\text{ cm}^3</math></p>	<p>Volume des 10 prélèvements de sol par rapport au volume de la parcelle (<math>V_3</math>)</p> $(V_3) = \frac{51,95\text{ cm}^3 (V_2) \times 10}{4\,050\,000\text{ cm}^3 (V_1)} \times 100$ <p><math>(V_3) = 0,01\%</math></p>

**Figure 3-1 :** Calcul du volume de sol prélevé par rapport au volume total d'une parcelle expérimentale (à 15cm de profondeur)



**Figure 3-2** Disposition dans une parcelle des prélèvements de sol

Les carrés représentent les quadrats des biomasses et les cylindres les emplacements des prélèvements de sol en 2007 et 2008. Quadrats 1 et 2 : 2006-8 SAT ; quadrats 3 et 4 : 2006-16 SAT ; quadrats 5 et 6 : 2007 8 SAT ; quadrats 7 et 8 : 2007-16 SAT ; quadrats 9 et 10 : 2008-8 SAT et quadrats 11 et 12 : 2008-16 SAT

Suite au prélèvement les échantillons sont placés en chambre froide afin de reproduire les conditions climatiques hivernales et ainsi favoriser la stratification des

graines. La température de stockage est de 4°C. Suite à cette période, les échantillons sont traités comme indiqué dans le protocole détaillé ci-dessous. Notons que les échantillons de 2006 et 2007 ont été traités en même temps, soit en début d'année 2008.

Dans notre cas, il y a donc 160 échantillons à traiter :

- 32 échantillons résultant des 8 grandes parcelles de chacune des 4 répétitions pour le début de notre expérience (début 2006).
- 128 échantillons résultant de chacune des sous parcelles pour les prélèvements après deux années de rotations (fin 2007).

Il est à noter que l'humidité des échantillons a été mesurée par séchage d'échantillons témoins à une température de 80°C pendant une semaine, jusqu'à poids constant. En moyenne l'humidité du sol était de 17,5% au moment des prélèvements que ce soit en 2006 ou 2007. Un échantillon de sol de 300g humide représente donc environ 247g de terre sèche en poids constant.

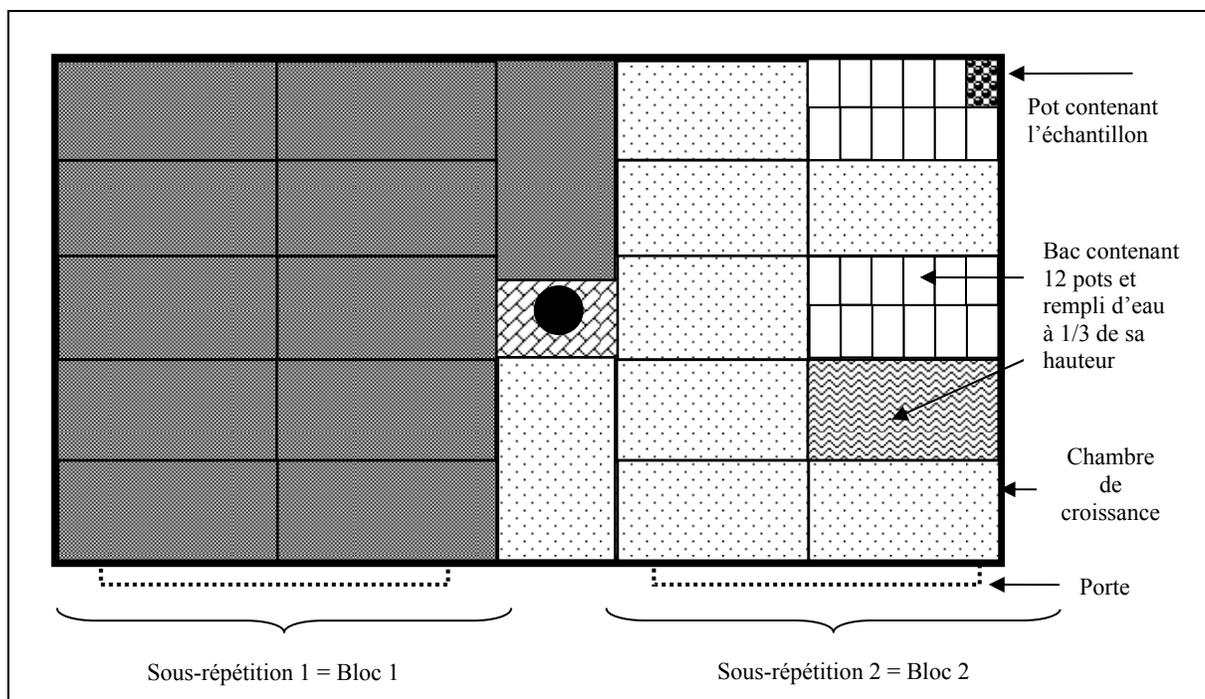
#### **3.3.4.2 Les chambres de croissance**

Chaque échantillon est divisé en deux sous-échantillons pour augmenter la représentativité des conditions de chambre de croissance par échantillon (Annexe 3.1). Il y avait donc environ 320 pots pour le cycle de germination. La répartition des pots se fait selon la place disponible dans la chambre de croissance, en formant deux blocs complets aléatoires reprenant les deux sous-répétitions. Les tâches d'arrosage et de comptage sont faites par sous-répétition pour limiter au maximum les variations liées aux changements de température et de lumière (ouverture des portes).

##### **- Caractéristiques de la chambre de croissance n°1 : échantillons de 2007**

Modèle **MTR30** de marque Conviron® : Surface de culture **3,34 m<sup>2</sup>** : Dimension intérieure **243 x 137 cm** : Température **10 à 45°C** : Intensité lumineuse Jusqu'à **600 micromoles/m<sup>2</sup>/s** Type de ventilation : **par le sol sur toute la surface de la chambre.**

La répartition des échantillons se fait en deux blocs contenant chacun une sous-répétition. À l'intérieur de chaque sous-répétition, les échantillons sont disposés de manière aléatoire (figure 3-3).

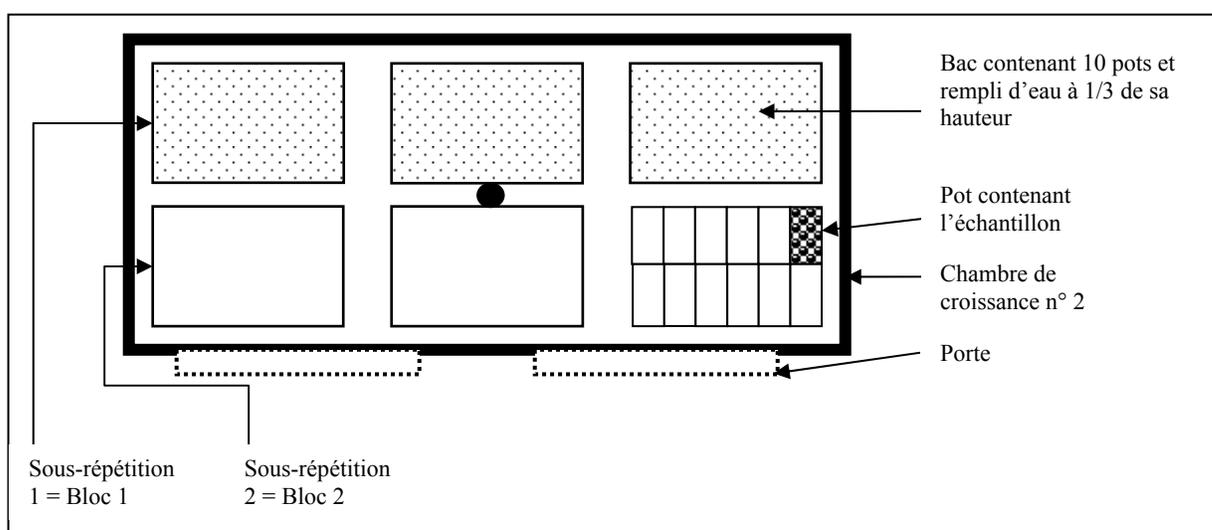


**Figure 3-3** Chambre de croissance montrant la disposition des échantillons de sol de 2007 (vue de haut).

### - Caractéristiques de la chambre de croissance n°2 : échantillons de 2006

Modèle **PGR15** de marque Conviron® : Surface de culture **1,4 m<sup>2</sup>** : Dimension intérieure **183 x 76 cm** : Température **10 à 45°C** : Intensité lumineuse **Jusqu'à 875 micromoles/m<sup>2</sup>/s**  
 Type de ventilation : **par le sol sur toute la surface de la chambre.**

La répartition des échantillons se fait en deux blocs contenant chacun une sous-répétition. À l'intérieur de chaque sous-répétition, les échantillons sont disposés de manière aléatoire (Figure 3-4).

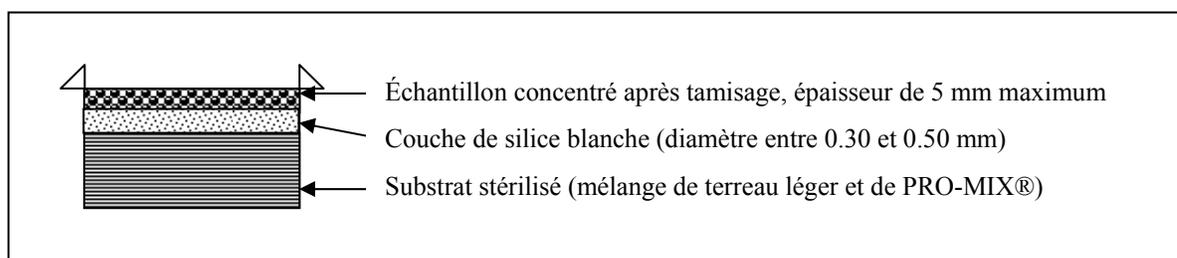


**Figure 3-4** Chambre de croissance montrant la disposition des échantillons de sol de 2006 (vue de haut).

#### 3.3.4.3 Support de culture et irrigation

La partie concentrée des échantillons est placée dans des pots rectangulaires en plastique de 10 cm de longueur, 8 cm de largeur et 5 cm de hauteur (Figure 3-5). Le choix de cette taille a été fait après plusieurs essais combinant le nombre d'échantillons à traiter, la place disponible dans les chambres de croissance et enfin l'épaisseur maximale de l'échantillon concentré.

Un mélange de terreau léger et de PRO-MIX® stérilisé est placé sur les deux premiers tiers du pot. Ce substrat a pour rôle un bon développement des plantules en vue d'une identification la plus rapide possible. Dans le dernier tiers du pot est placée une couche de silice et enfin de l'échantillon concentré. Une silice blanche a été choisie, car elle permet d'établir une barrière visuelle entre l'échantillon et le substrat. Cet élément est très important lors du retournement du sol d'une part (pour ne pas retourner le substrat), mais aussi pour la récupération des échantillons après la période de germination (pour la quantification des graines n'ayant pas germé). Cette récupération est faite par tamisage et il convient de choisir des grains de silice ayant un diamètre inférieur (diamètre entre 0.30 et 0.50 mm) au tamis le plus fin pour ne récupérer que l'échantillon. Ces pots sont ensuite disposés dans des bacs étanches par groupe de 12. Leur distribution est aléatoire à l'intérieur des bacs.



**Figure 3-5** Schéma du contenu des pots montrant l'échantillon concentré de sol

L'irrigation des échantillons se fait directement dans le fond des bacs. L'absorption de l'eau est donc faite par capillarité. L'irrigation par le dessus des échantillons est fortement déconseillée à cause des possibles projections de terre et de graines. De plus, une irrigation ne doit pas dépasser les deux tiers de la hauteur du bac pour éviter tout risque d'inondation des échantillons.

Le choix des périodes d'irrigation a été fait en fonction du dessèchement des échantillons. La fluctuation des températures est le premier facteur qui augmente le nombre d'arrosages suivi du nombre de graines ayant germé. Ce dernier point n'est pas à négliger, surtout pour les échantillons des parcelles témoins où le nombre de plantules par pot peut rapidement dépasser la centaine. Dans tous les cas, l'eau ne doit pas être un facteur limitant la germination des graines. L'apparition de plantes de la famille des mousses (*Bryophyta*)

peut être un problème qui apparaît lorsque l'arrosage est trop abondant et trop fréquent. Ce phénomène apparaît surtout en fin de cycle de germination vers le 30<sup>ème</sup> jour. Le retournement du sol et le séchage total des échantillons avant la deuxième période de germination ont permis de régler ce problème sans difficulté.

#### **3.3.4.4 Températures pour la germination**

Le cycle de température retenu tient compte des températures réelles en condition de culture à la station agronomique de l'Université Laval à Saint-Augustin-de-Desmaures (Annexes 2.1, 2.2 et 2.3), mais aussi de la demande en température de certaines espèces comme l'amarante à racine rouge (*Amaranthus retroflexus*). Une fluctuation des températures a été prévue également pour augmenter le pourcentage de germination des semences viables. La photopériode est de 15h de lumière par jour (6h-21h) et de 8h d'obscurité. La source de lumière est assurée par les néons à l'intérieur des chambres de croissance. Pendant la nuit la température varie entre 15 et 16°C. Ce cycle de température (Annexe 3.2) compris entre 6 et 7 semaines sera répété une deuxième fois après retournement du sol après 40 jours environ, c'est-à-dire une semaine après les dernières levées significatives. La deuxième période diffère légèrement de la première, puisque le pic de température intervient plus tôt (Annexe 3.2).

#### **3.3.4.5 Tamisage**

Lors du premier essai de germination à l'hiver 2007, nous avons pu constater la grande diversité d'espèces présentes sur le site de Saint-Augustin-de-Desmaures. Néanmoins, les espèces les plus importantes à quantifier sont celles qui produisent annuellement des semences dans les parcelles expérimentales. Le tableau 3-1 présente un bref récapitulatif des cinq espèces dominantes sur le site.

**Tableau 3-1** Description des graines des principales espèces du site

<b>Espèces</b>	<b>Forme et diamètre des graines</b>	<b>Caractéristiques de levée</b>
<i>Chenopodium album</i>	Reniforme arrondie 1-1,15 mm	Levée hâtive
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	Reniforme arrondie > 2mm	Levée échelonnée
<i>Setaria glauca</i>	Ovale 2,5mm x 1,2 mm	Levée tardive
<i>Panicum dichotomiflorum</i>	Ovale 2,5mm x 3,4 mm	Levée tardive
<i>Amaranthus retroflexus</i>	Lenticulaire 0,8-1 mm	Levée à température >35°C

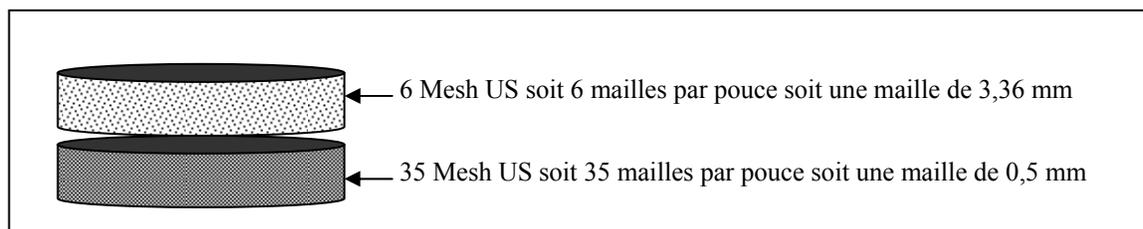
L'étape du tamisage demande beaucoup de précautions, afin de ne pas laisser passer des semences au travers des tamis et lors de la manipulation en général. Le choix des tamis reste important pour optimiser au maximum le rapport entre la quantité de l'échantillon réduite et la « qualité » de l'échantillon (diversité et nombre de graines retrouvées).

L'utilisation de deux tamis superposés a deux objectifs. Le premier est de séparer les particules de sol avec l'aide du jet d'eau projeté par le haut du tamis. Le deuxième est de récupérer les grosses graines et les résidus d'une part et la partie concentrée de l'échantillon d'autre part. Le choix de ces tamis a été fait suite à une série d'essais avec tous les tamis présents au laboratoire. Les critères de choix ont été :

- Le diamètre de la maille : surtout pour le tamis du bas, car il ne devait pas laisser passer les graines les plus petites de notre expérience. Un tamis très fin (35 Mesh US) a été choisi pour récupérer toutes les particules de diamètre supérieur à 0,5 mm (Figure 3-6). Cette marge de 0,5 mm par rapport à nos graines les plus petites, apporte une marge de sécurité suffisante. Pour le tamis du haut, la maille devait être suffisamment fine pour récupérer les gros résidus (roche, résidus végétaux) et suffisamment grosse pour laisser passer la plus grande majorité des graines. Le tri des graines et des résidus restant sur le tamis supérieur doit être rapide, car la méthode repose avant tout sur une quantification par germination et non pas sur une identification visuelle de la graine.

- La forme et le matériau de fabrication du tamis : Des tamis circulaires en acier inoxydable de marque Tyler® ont été utilisés. Ces tamis présentent plusieurs avantages à commencer par leurs rebords remontant sur 10 cm environ et permettant de réduire le risque de perte de

graines au moment du lavage. L'emboîtement étanche des tamis est aussi un avantage de même que leur matériau de construction qui assure une bonne solidité pour le traitement d'un nombre important d'échantillons. Enfin, la forme circulaire des tamis a permis de récupérer facilement l'échantillon concentré.



**Figure 3-6** Description détaillée des tamis

Voici les étapes détaillées du processus de tamisage qui commence lors de la pesée des échantillons et qui se termine par l'étalement de la fine couche d'échantillon sur la silice.

### **Étape 1 : Mesure du volume et du poids de l'échantillon de sol**

- Prendre l'échantillon récolté au champ et le verser dans un contenant propre
- Rendre l'échantillon homogène (briser les carottes de terre et mélanger)
- Mesurer dans un contenant un volume d'environ 600 ml de terre représentant un poids de 600g.
- Peser deux échantillons dans des contenants différents pour avoir deux sous-répétitions de 300g chacune.
- Récupérer le reste de l'échantillon de départ pour une éventuelle utilisation future (manipulation accidentelle pendant le tamisage).

### **Étape 2 : Tamisage**

- Montage des tamis et vérification de la propreté.
- Verser le contenu du nouvel échantillon sur le premier tamis de manière uniforme.
- Rincer le contenant au dessus du tamis avec précaution.
- Avec un jet dirigé, commencer à faire traverser l'échantillon dans les tamis. Arrêter lorsqu'il ne reste que quelques mottes (environ 10 secondes).
- Avec une spatule molle (silicone) écraser les mottes et réutiliser le jet pour finir le passage du premier tamis (environ 10 secondes).

- Supprimer les racines, la végétation et les cailloux présents dans le tamis du haut et vérifier l'absence de graines (les répertorier si présentes).
- Enlever le tamis du haut et diriger le jet pendant 20 secondes au-dessus du tamis fin.

### **Étape 3 : Récupération de la partie concentrée**

- Récupérer avec le jet le contenu du dernier tamis au-dessus du pot et rincer le tamis et les accessoires toujours au-dessus de l'échantillon.
- Rincer à l'envers le tamis au dessus du contenant.
- Verser dans le contenant où se trouve le terreau stérilisé (ou un autre support de croissance) en formant une couche épaisse de 3 à 5 mm au maximum.
- Déposer le contenant dans le bac qui servira de support dans la chambre de croissance.
- Nettoyer bien les tamis et faire la même manipulation pour l'échantillon n°2 de la parcelle.

#### **3.3.4.6 Comptage des germinations de mauvaises herbes**

Le comptage des levées doit se faire dès le stade cotylédon si possible. La compétition peut être très rapidement un facteur limitant la germination des graines suivantes. Dans les échantillons des parcelles non traitées, on constate des densités de levées élevées et, lors du comptage on retrouve des plants morts qui n'ont pas eu assez de lumière pour poursuivre leur développement et leur identification s'en trouve plus difficile. Au besoin, le transfert vers un contenant extérieur des plantules peut être une bonne alternative si l'identification des plantules reste difficile même après l'apparition des premières feuilles. Le retrait des plantules doit être le plus délicat possible pour ne pas perturber la germination des autres graines. Il est recommandé de rincer les racines au dessus du pot, car elles accrochent d'autres graines. Quand les racines étaient trop encrées dans le sol, les plants ont été coupés au ras de la surface pour éviter de perturber le reste de l'échantillon. La fréquence des comptages dépend de la période. En moyenne deux visites par semaine permettent de bien répertorier les levées et d'assurer que les plantes ne manquent pas d'eau. Une semaine

après les dernières levées significatives il faut faire un dernier relevé des plantules avant de retourner le sol.

#### **3.3.4.7 Mesure de la banque viable totale sur un sous-échantillon**

Cette étape permet de mesurer quelle proportion de la banque viable a pu germer pendant la période de germination et ainsi valider l'efficacité de la méthode. Une vérification n'a pas été faite pour tous les échantillons, car cette opération est très longue et demande énormément de précautions. Seulement 32 échantillons ont été traités, ce qui correspond à une sous répétition de la première répétition. Dans un premier temps, l'échantillon concentré a été récupéré et à nouveau tamisé pour supprimer les mousses, les racines et la silice. Ensuite un premier tri visuel a été fait à la loupe pour ramasser les graines apparemment viables et éliminer toutes les graines vides. Cette étape a été l'une des plus fastidieuses du protocole, car elle demande une attention accrue sur les échantillons et surtout une bonne pratique de la reconnaissance de graines de mauvaises herbes. Par la suite une deuxième vérification des graines retrouvées a été faite avec une loupe binoculaire cette fois-ci pour vérifier l'état de chaque graine par groupe de 10 environ. Enfin, les graines restantes ont été testées au sel de tétrazolium, tel que présenté ci-dessous.

#### **3.3.4.8 Test de viabilité au sel de tetrazolium**

La méthode de Ellis et coll. (1985 ; test de viabilité au sel de tetrazolium) a été suivie. La première étape consiste à créer une solution liquide de sel de tétrazolium à une concentration de 1%. Pour 200 ml de solution, deux grammes de sel de tetrazolium ont donc été nécessaires. Cette quantité a été suffisante pour tester l'ensemble des échantillons. Pour de bons résultats la solution a été conservée à l'obscurité, à une température comprise entre 3 et 5°C pendant la durée de la manipulation, à savoir deux jours. Les graines de graminées ont été coupées de façon transversale avec une lame de rasoir, du côté de l'embryon. Pour les graines plus petites telles que les chénopodes (*Chenopodium sp.*) ou les amarantes (*Amaranthus sp.*), l'endosperme a été percé avec une aiguille. Les graines une fois découpées et percées ont été placées dans des éprouvettes contenant un fond de la solution pendant 24 h à température ambiante.

L'étape suivante consistait à faire un double rinçage des graines à l'eau distillée pour enlever le surplus de colorant. Pour finir, chaque graine fut vérifiée à l'aide d'un microscope. L'utilisation des critères suivants nous a permis de mesurer la viabilité des graines :

-Coloration rosée : tissus considérés morts et graine non viable

-Coloration rouge brillant : tissus considérés vivants et graine viable

-Coloration rouge très foncé : tissus considérés morts ou coloration liée à une autre activité (champignons) et graine non viable.

### **3.3.5 Variables étudiées**

#### **3.3.5.1 Viabilité totale des graines**

La viabilité totale correspond au nombre total de graines viables par sous-échantillon. Après la fin des périodes de germination, une trentaine d'échantillons de sol sont tamisés une nouvelle fois et les graines récoltées sont soumises au sel de tetrazolium. Le nombre de graines viables est ensuite ajouté au nombre de graines levées durant les périodes de germination. Cette somme correspond au nombre total de graines viables. Ce comptage permettra d'obtenir le pourcentage moyen de germination de la méthode utilisée en comparaison avec la méthode mixte de référence (Heerdt et coll. 1996). De plus, l'étude des levées de chaque espèce par période, renseignera sur la nécessité d'utiliser une ou deux périodes de germination pour des expériences futures.

#### **3.3.5.2 Étude quantitative de la banque de semences**

L'étude quantitative de la banque de semences se résume au dénombrement des graines de chaque espèce retrouvée dans chaque échantillon. Elle correspond à la somme des comptages effectués dans les chambres de croissance. Cette variable permet de comparer les traitements entre eux grâce à l'analyse de variance. Elle est exprimée par le nombre moyen de graines par échantillon pour chaque traitement (un échantillon correspond à environ 247g de sol sec). Les banques totales des dicotylédones annuelles, des graminées annuelles et la banque totale de toutes les espèces retrouvées seront estimées.

### 3.3.6 Analyses statistiques avec la procédure MIXED

La même démarche statistique que celle décrite au paragraphe 2.3.4.1 (chapitre 2) a été utilisée. Puisque le facteur « Dose » appliqué en sous-parcelle revient chaque année au même endroit, une analyse en mesures répétées reste la plus appropriée. Le facteur « Années » représente donc la sous-sous parcelle de l'expérience qui s'analyse comme un tiroir subdivisé. Pour cela la procédure MIXED du logiciel SAS® a été une nouvelle fois utilisée pour analyser l'effet combiné des années, des séquences culturales et des doses d'herbicide. Au préalable, l'homogénéité des variances et la normalité des résidus ont été vérifiées. La transformation des données a été nécessaire pour toutes les variables analysées. La transformation choisie fut LOG (x+1) car elle permet de conserver les valeurs zéro du jeu de donnée. Cette étape a été également réalisée dans SAS® avec un logarithme naturel (base 2,718). Le modèle présente des effets principaux et des interactions tels que décrit au paragraphe 2.3.4.1. La séquence de programmation détaillée est présentée à l'annexe 3.1.

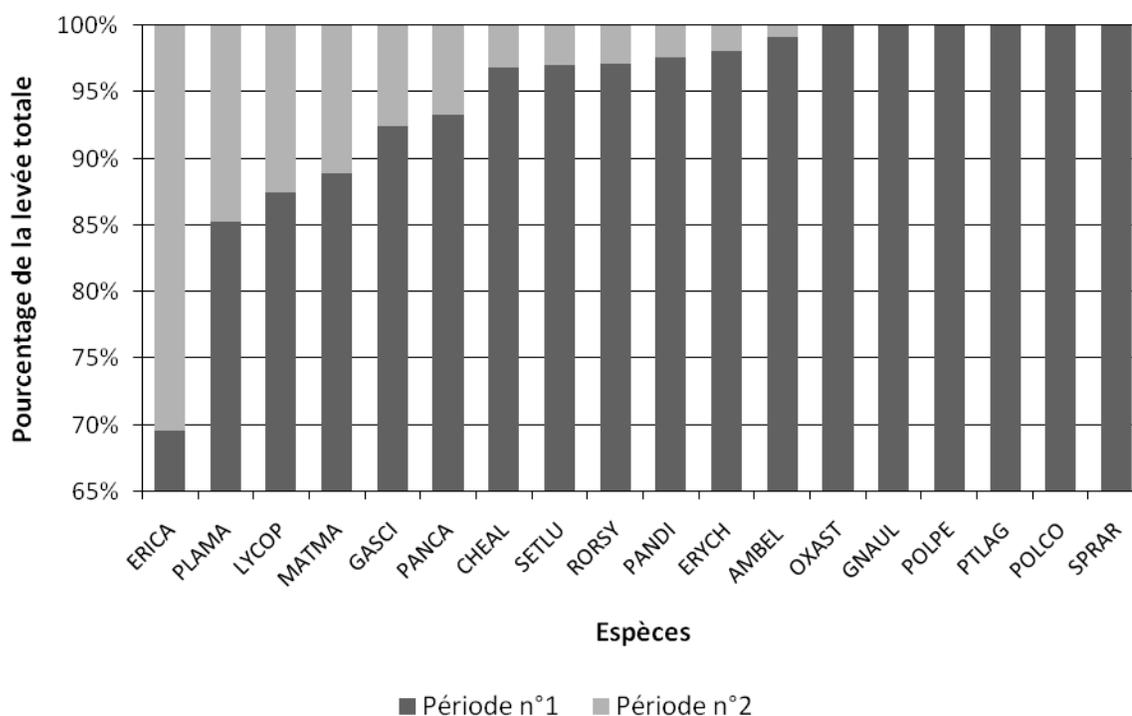
Le test statistique utilisé diffère de celui utilisé au chapitre 2. Les séquences n'étant pas terminées (seulement deux années) les contrastes à priori ne sont donc pas pertinents pour la variable banque de graines. Le test effectué est donc un LSMEANS qui effectue toutes les comparaisons possibles entre les traitements par paire. Ce test permet donc de comparer l'effet moyen des différentes doses et des différentes séquences grâce aux erreurs types issues de ce test. Ces tests sont effectués uniquement pour les variables quantitatives de la banque de graines. L'évaluation de l'efficacité de la méthode s'effectue par des statistiques descriptives.

## 3.4 Résultats et discussion

### 3.4.1 Efficacité de la méthode utilisée

#### 3.4.1.1 Répartition des levées

L'étude de la répartition des levées nous permet de constater que pour toutes les espèces la majorité des graines a germé durant la première période de germination (Figure 3-7). Les espèces ayant le plus besoin d'une seconde période sont des espèces vivaces telles que le plantain majeur (*Plantago major*, PLAMA) ou le lycophe (*Lycopus virginicus*, LYCOP). On trouve également la vergerette du Canada (*Erigeron canadensis*, ERICA), ou encore le galinsoga cilié (*Galinsoga ciliata*, GASCI). Nous avons déjà observé que le galinsoga cilié émergeait tardivement dans les parcelles du site expérimental. Les graines des espèces les plus abondantes du site (chénopode, herbe à poux, panic d'automne et sétaire glauque) ont levé dans plus de 90% des cas durant la première période.



**Figure 3-7** Répartition des levées par espèce et par période de germination

Le détail des périodes est présenté à l'annexe 3.2 et les noms des espèces sont présentés dans l'annexe 3.3.

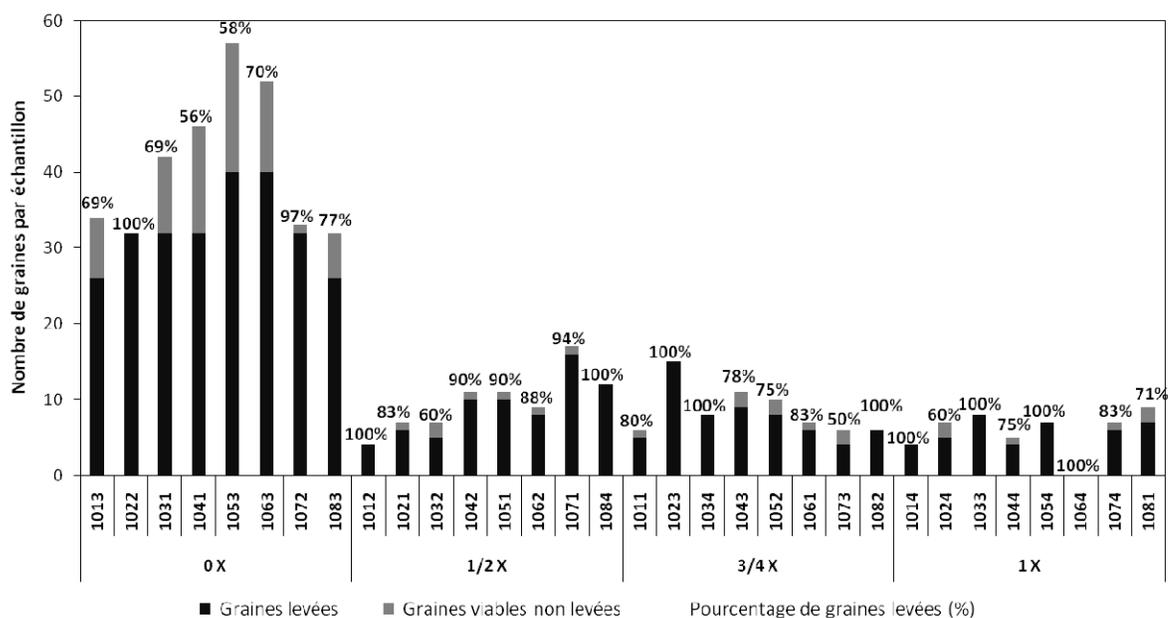
Ces résultats montrent que les espèces les plus représentatives du site expérimental ont eu le temps de germer durant les deux périodes. Ce temps de deux périodes de quarante jours est, d'un autre côté, relativement court en comparaison avec une mise en germination classique qui prend plusieurs mois. L'utilisation de cette méthode semble donc bien adaptée aux contraintes de cette expérience. La quasi-absence d'amarante, une espèce observée au champ, suggère que les conditions de germination et d'émergence n'étaient pas appropriées pour cette espèce. Toutefois, dans les parcelles à l'étude, cette espèce est présente de façon très hétérogène et très irrégulière dans le temps. Au moment du test de viabilité, une faible proportion de graines de cette espèce a été testée, avec pour résultat aucun signe de viabilité. Donc le problème semblerait plutôt lié d'une part à la qualité des graines, ou d'autre part, à l'échantillonnage des carottes de sol, qui n'est pas représentatif de la distribution spatiale des graines de cette espèce. D'autres expériences avec l'amarante à racines rouges semblent nécessaires pour répondre à ces questions. Toutefois, il serait très difficile de créer des conditions optimales de germination pour chaque espèce en même temps.

#### **3.4.1.2 Pourcentage de graines levées**

Le pourcentage de graines viables levées est obtenu grâce aux graines retrouvées dans les 32 échantillons témoins, et qui ont passé avec succès le test de viabilité. La figure 3-8 présente le rapport entre le nombre de graines viables total et le nombre de graines ayant germées durant les deux périodes (les échantillons correspondent au prélèvement de 2007). En moyenne sur les trente échantillons analysés, 83% des graines viables avaient germé, ce qui représente un pourcentage très acceptable par rapport à la méthode mixte de référence (Heerdt et coll. 1996) qui affichait des pourcentages compris entre 81 et 100%.

Dans les parcelles témoins on retrouve le plus de graines viables non germées avec des pourcentages de germination variant de 55 à 100% (Figure 3-8). Pour les parcelles traitées, les pourcentages varient plus généralement de 75 à 100% malgré quelques exceptions. Les pourcentages plus élevés de graines viables non levées dans les parcelles témoin pourraient être causé par la grande densité de plantules dans le pot placé en chambre de croissance. Il pourrait avoir limité le nombre de levées potentielles (les conditions entourant chaque graine étaient moins optimales que dans les autres traitements) ou induire plus de dormance

secondaire. Autre conséquence, la modification du rapport rouge/infrarouge engendré par la présence de végétation a pu promouvoir la dormance (Dong-Sheng et coll. 2008).



**Figure 3-8** Pourcentage de graines levées par rapport au nombre total de graines viables. Échantillons de 2007.

*Le total des graines viables est représenté par l'addition des graines levées pendant les périodes de germination (barres noires) et des graines considérées viables après le test de viabilité (barres grises). Le taux de germination (%) est indiqué au-dessus de chaque barre. Un échantillon de sol représente approximativement 247g de terre sèche (poids constant).*

À la vue des deux paramètres de mesure de l'efficacité de la méthode, un constat positif se dessine. Les pourcentages de germination sont bons et le temps nécessaire pour arriver à ce résultat est considérablement réduit par rapport aux autres méthodes. Deux mois ont été nécessaires (tamisage, germination et comptages) pour évaluer cette banque de graines. Pour évaluer la banque de graines totale, le traitement des 32 échantillons témoin a été considérablement long (environ 1 mois à temps plein avec la participation de deux personnes). Ce point a permis de confirmer la lourdeur et la lenteur de la séparation physique des graines et du sol, décrit dans l'étude de Ishikawa-Goto & Tsuyuzaki (2004).

En comparaison, d'une part, la séparation physique des graines et du sol suivie d'un tri manuel aurait pris en moyenne une journée par échantillon (d'après nos estimations), avec

un risque d'erreur très important (Heerdt et coll. 1996). Pour traiter les 160 échantillons il aurait donc fallu plus de 5 mois à temps plein, ce qui représente environ le double de temps que la méthode utilisée dans cette étude, sans compter le risque d'erreur lié à la reconnaissance des graines. De plus, un test de viabilité des graines aurait été nécessaire si nous avions voulu connaître la banque de graines viables. Ce temps (non estimé) s'ajouterait donc aux cinq mois déjà requis.

D'autre part, la méthode de germination des graines directement en serre aurait également pris un temps très supérieur par rapport à la méthode utilisée dans cette étude. Roberts (1981) suggérait une période moyenne de deux années pour une quantification efficace en serre. La méthode mixte permet donc de gagner considérablement du temps, mais aussi beaucoup d'espace et d'énergie (chambre de croissance).

Toutefois, la méthode utilisée dans cette étude reste perfectible. Les points à améliorer seraient par ordre d'importance : la qualité et la rapidité du tamisage (qui demande beaucoup de précision et des outils très propres), le choix des températures (en étudiant plusieurs types de cycles), et enfin l'échantillonnage au champ (Benoit et coll. 1989).

### **3.4.2. Étude quantitative de la banque de semences**

#### **3.4.2.1 Nombre de graines levées de dicotylédones annuelles**

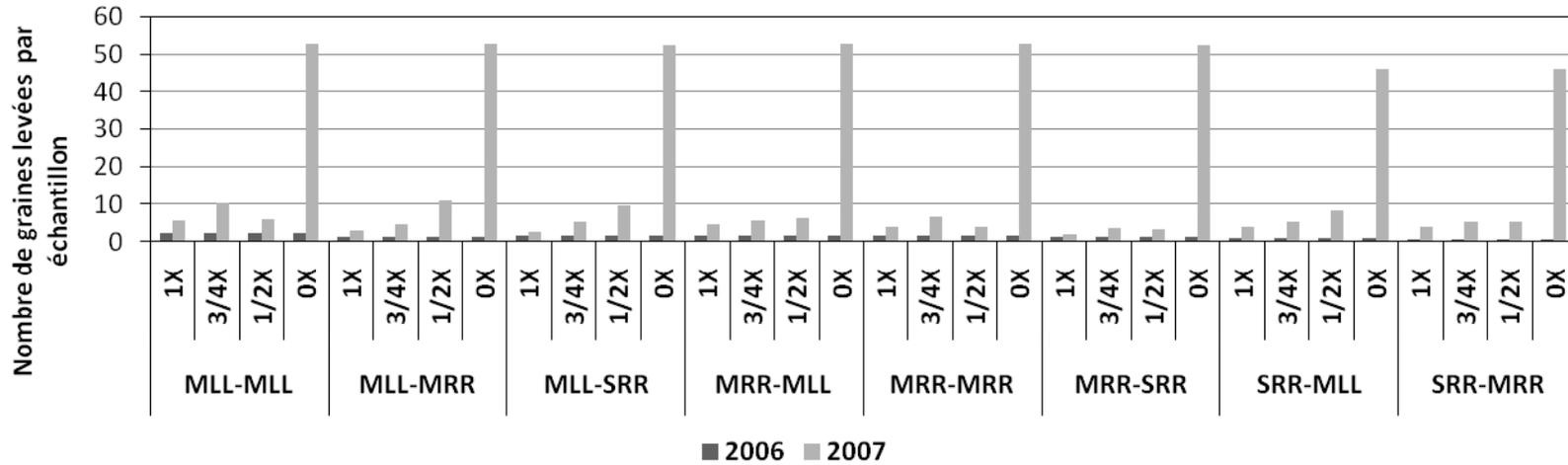
Le nombre de graines levées est différent selon la dose d'herbicide et l'année de culture (Annexe 3.4 et Figure 3-9). La séquence culturale a un effet significatif, mais très faible en comparaison de la dose ou de l'année (Annexe 3.4 et Figure 3-10).

##### Séquences culturales

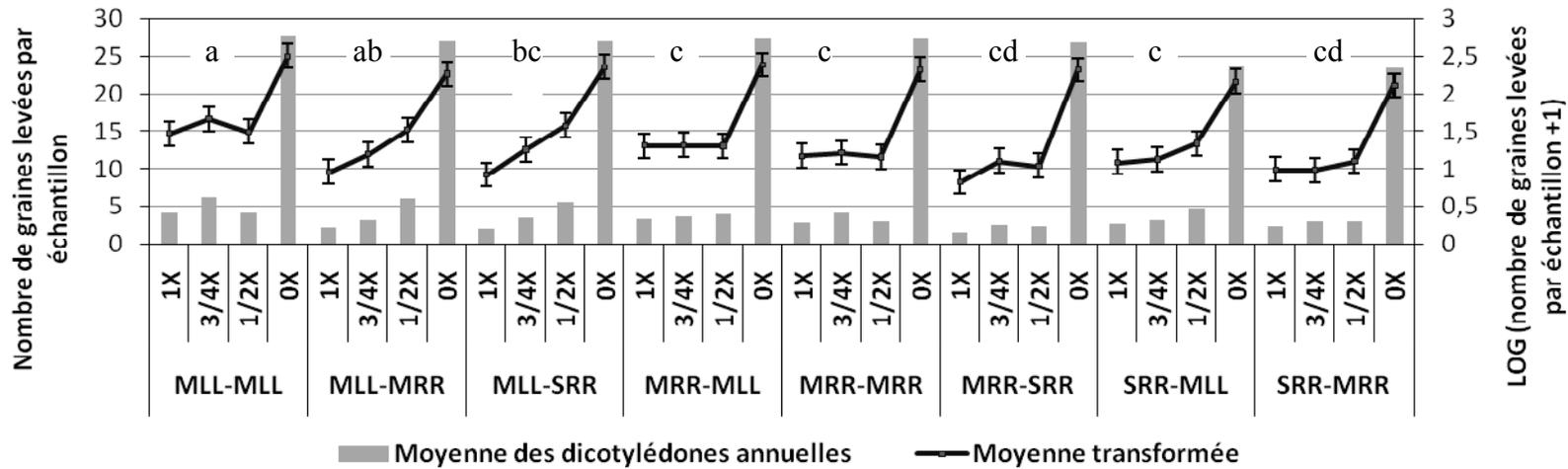
En 2006, la banque de semences des dicotylédones annuelles était uniforme sur tout le site expérimental avant de débiter cette étude (Figure 3-9). En 2007, les séquences culturales présentent de faibles différences significatives entre elles (Figure 3-10). On constate une tendance de la séquence MLL-MLL qui a plus de graines levées par échantillon (15 à 20 graines par échantillon) en comparaison des autres séquences dont les parcelles traitées ont plutôt entre 10 et 15 graines par échantillon. Ce résultat confirme l'effet du glufosinate sur le contrôle des mauvaises herbes, décrit au chapitre précédent. De plus, on constate que les séquences utilisant le glyphosate deux années de suite combiné à une rotation de culture ont le moins de graines levées (Figure 3-10). Les bons résultats de répression de mauvaises herbes par le glyphosate mentionnés au chapitre précédent se reflètent dans la banque de graines. Concernant les autres séquences, les résultats varient peu et on constate que l'utilisation en alternance des deux herbicides ne procure pas une augmentation importante de la banque de graines des dicotylédones annuelles.

##### Doses d'herbicide

L'effet simple de la dose d'herbicides sur chaque séquence est présenté à la figure 3-10 en comparant les erreurs types de la variable transformée. On constate qu'il n'y a pas de différence significative entre les doses réduites et les doses pleines pour les séquences n'utilisant que du glyphosate. Ce résultat est aussi valable dans les séquences où le glyphosate est utilisé en première année. Les différences apparaissent lorsque le glufosinate a été utilisé en première année en rotation de culture ou en monoculture de maïs.



**Figure 3-9** Nombre de graines de dicotylédones annuelles levées par échantillon en 2006 et 2007 selon la séquence et la dose utilisée.



**Figure 3-10** Moyenne des graines levées de dicotylédones annuelles par échantillon selon la séquence et la dose utilisée. Moyenne des années 2006 à 2007. Un échantillon de sol représente approximativement 247g de sol sec (poids constant).

Ces résultats confirment les résultats de Sikkema et al. (2004) sur la tendance de la banque de graines de *Chenopodium album* à ne pas augmenter à dose réduite de glyphosate. Nos résultats montrent qu'une utilisation durant deux années de suite du glyphosate à demi-dose n'entraîne pas de différences significatives avec la dose homologuée pour l'ensemble des graines de dicotylédones annuelles. Toutefois, l'utilisation du glufosinate avant le glyphosate tend à démontrer l'inverse (i.e. une augmentation de la banque de graines) ce qui est en concordance avec les résultats du chapitre précédent.

#### **3.4.2.2 Nombre de graines levées de graminées annuelles**

Le nombre de graines des graminées annuelles est différent selon la dose utilisée d'herbicide et l'année de culture (Annexe 3.4 et Figure 3-11). La séquence n'influence pas cette variable significativement.

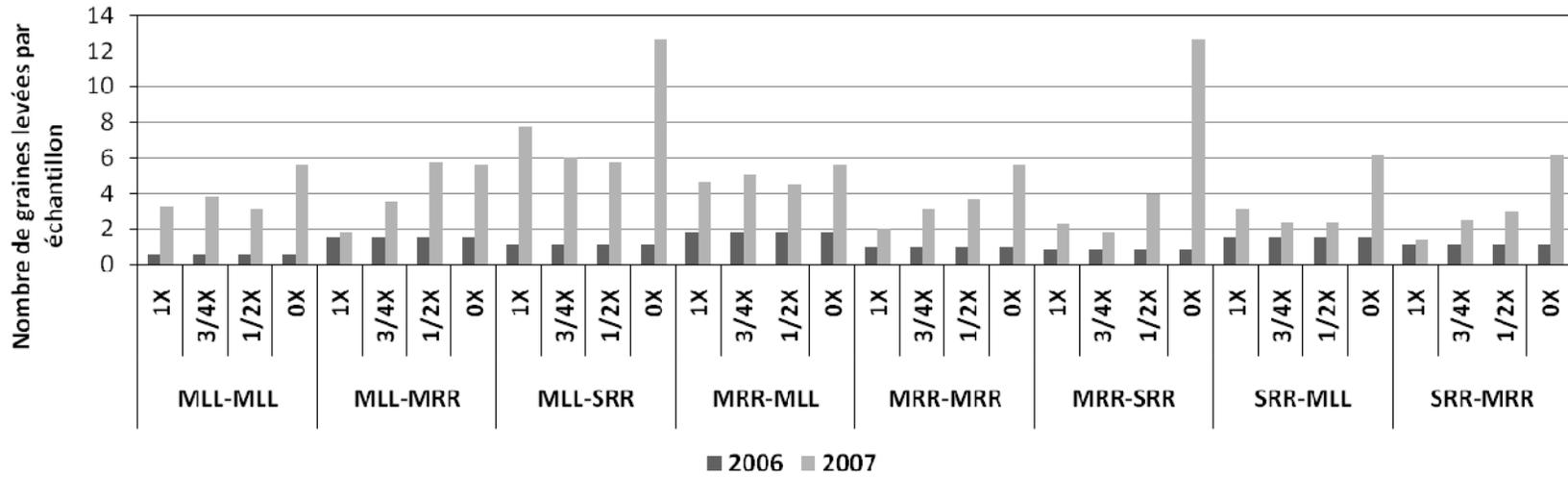
##### Séquences culturales

En 2006, la banque de semences des graminées annuelles était uniforme sur tout le site expérimental avant de débiter cette étude. En 2007, les séquences culturales ne présentent pas de différences significatives entre elles et ne sont donc pas présentées graphiquement. Toutefois, la figure 3-11 permet de juger de cette faible variation, car le nombre de graines de graminées annuelles varie seulement entre 2 et 8 graines par échantillon en 2007. Ce résultat paraît surprenant en comparaison des résultats de répression et de biomasses sèches des graminées du chapitre précédent qui montraient de fortes différences entre les séquences utilisant le glufosinate et celles n'utilisant que du glyphosate. La banque de graines de ces espèces semble donc évoluer plus lentement après seulement deux années de cultures. Toutefois, ces résultats ne tenant pas compte de la troisième année, ces conclusions doivent être confirmées par l'étude des échantillons la dernière année. Il se peut que la densité des graminées dans les parcelles soit la cause de ce résultat. Il serait possible que les fortes densités de graminées annuelles observées dans les parcelles traitées au glufosinate développent un nombre de graines peu important en raison de la forte compétition. Il se peut aussi que ces mauvaises herbes n'arrivent pas à produire des graines matures faute de ressources en éléments nutritifs (toujours lié à une forte compétition). En

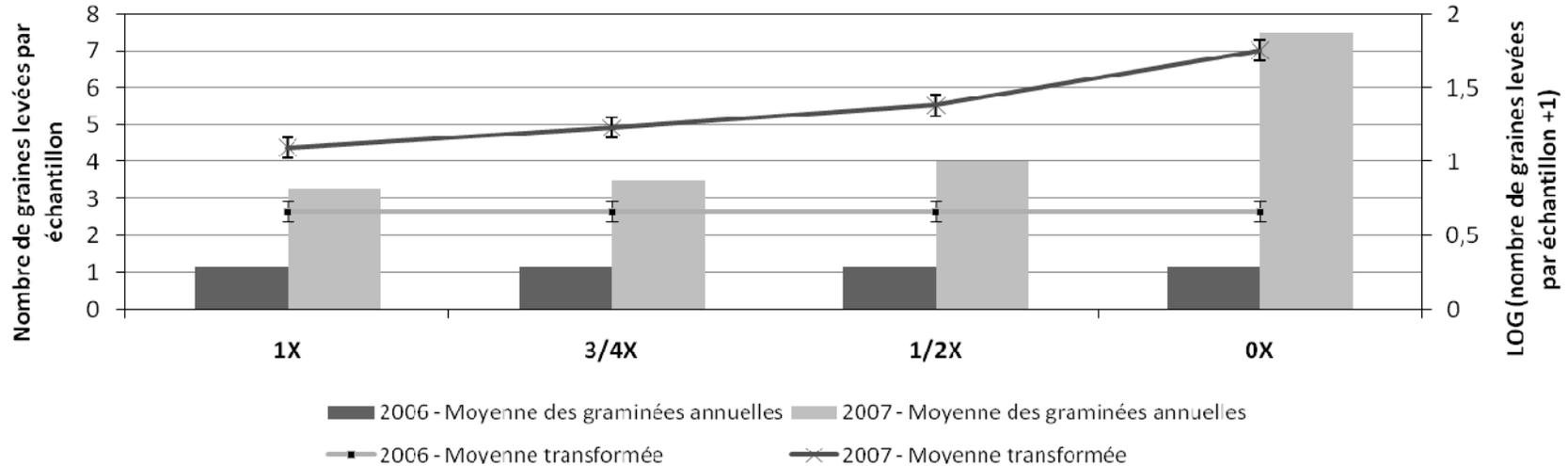
comparaison, les faibles densités de graminées annuelles observées dans les parcelles traitées au glyphosate pourraient développer une production de graines aussi importante que les parcelles traitées au glufosinate grâce à une faible compétition pour l'espace et les éléments nutritifs. Cette théorie expliquerait donc pourquoi après deux années de séquences on constate un effet dose important et un effet séquence non significatif.

#### Doses d'herbicide

L'effet principal de la dose est présenté à la figure 3-12 en comparant les erreurs types de la variable transformée. Globalement sur toutes les séquences, on constate après deux années de cultures que les doses réduites augmentent significativement la banque de graines des graminées annuelles. La réduction des doses d'herbicides semble donc déconseillée en présence abondante de graminées annuelles sur la parcelle.



**Figure 3-11** Nombre de graines de graminées annuelles levées par échantillon en 2006 et 2007 selon la séquence et la dose utilisée.



**Figure 3-12** Moyenne des graines levées de graminées annuelles par échantillon selon la dose utilisée. *Un échantillon de sol représente approximativement 247g de sol sec (poids constant).*

L'effet non significatif des séquences pour cette variable après deux années de cultures ne nous permet pas de confirmer ou d'infirmer les résultats de Sikkema et al. (2005). Dans leur étude les auteurs avaient conclu en l'absence d'augmentation significative de la banque de graines de *Echinochloa crus-galli* avec une demi-dose de glyphosate. L'étude des échantillons pris après la troisième année de la séquence (non complétée au moment du dépôt du mémoire) apportera plus de précision sur cette variable, même si après deux années, l'utilisation de doses réduites semble compromise en présence de graminées annuelles, quel que soit l'herbicide utilisé.

### 3.4.2.3 Nombre de graines levées total par échantillon

Le nombre de graines total est différent selon la dose utilisée d'herbicide et l'année de culture (Annexe 3.4 et Figure 3-13). La séquence culturale représente un effet significatif mais très faible en comparaison de la dose d'herbicide ou de l'année (Annexe 3.4).

#### Séquences culturales

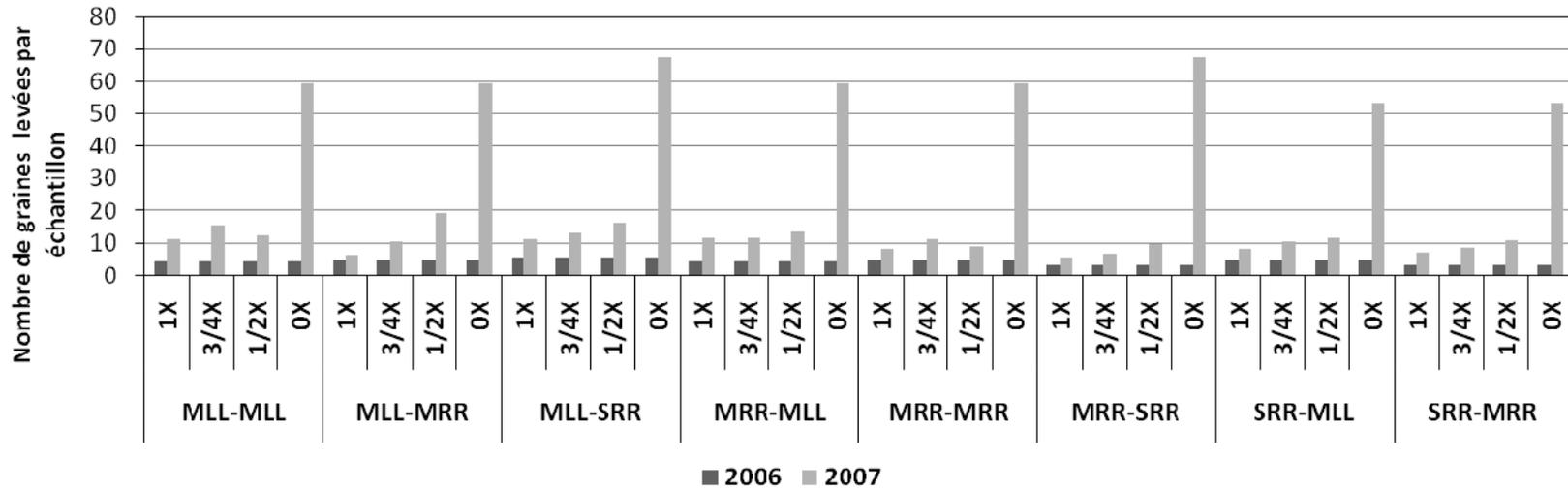
En 2006, la banque totale de graines était uniforme sur tout le site expérimental avant de débiter cette étude (Figure 3-13). En 2007, les séquences culturales présentent de faibles différences significatives entre elles (Figure 3-14). On constate que comme pour les dicotylédones annuelles, les deux séquences traitées au glyphosate deux années de suite et en rotation avec le soya ont tendance à avoir moins de graines levées par échantillon que les autres séquences (autour de 20 graines par échantillons). Ce résultat confirme une nouvelle fois l'attrait du glyphosate en utilisation unique pour le désherbage des cultures. Les autres séquences ne présentent pas de différences significatives entre elles, ce qui paraît une nouvelle fois étonnant au vu des différences qui avaient été établies au chapitre précédent. Les résultats des échantillons pris en 2008 permettront de préciser ou non les tendances observées au bout de deux ans.

Le travail du sol fait dans les parcelles de cette étude pourrait avoir une incidence sur les résultats obtenus, en particulier sur la banque de graines. Chaque année un labour conventionnel était fait après la récolte et il est possible qu'une partie significative de la

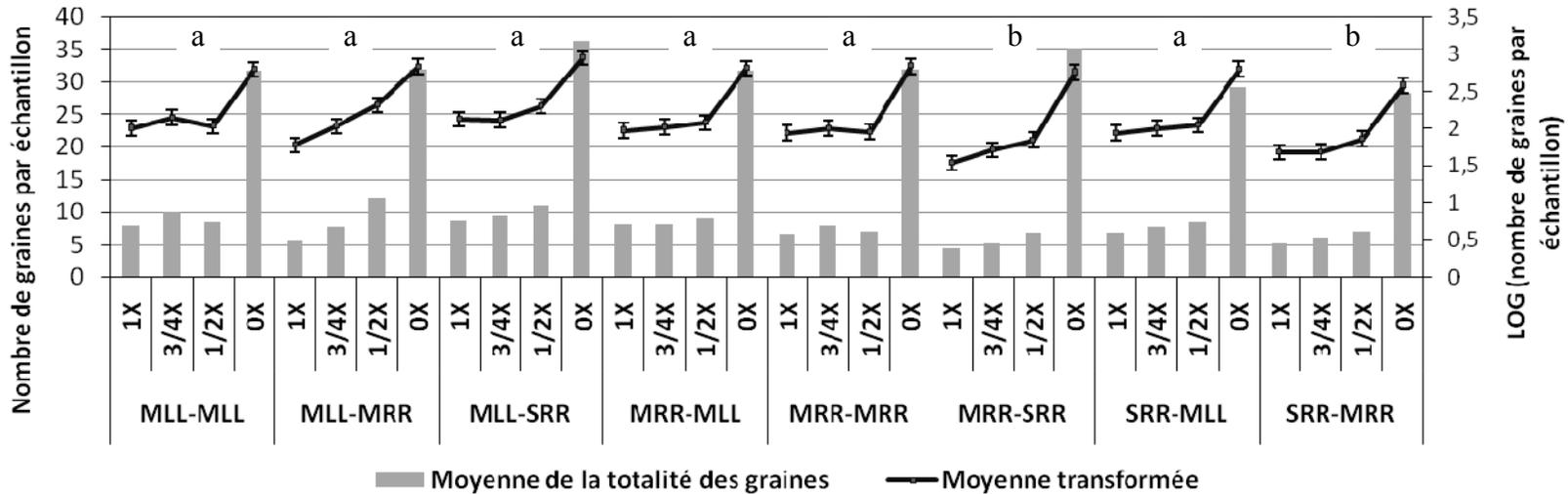
banque de graines soit ensevelie en profondeur. Dans ce cas, les mesures ne montrent qu'une partie (en surface) de la banque de graines, ce qui expliquerait la réaction plus lente de la banque de graines par rapport aux variables de répression et de biomasse des mauvaises herbes. Seule une étude à plus long terme (supérieure à trois ans) et combinant différents types de travail du sol pourrait permettre de répondre à cette question.

#### Doses d'herbicide

L'effet simple de la dose d'herbicide à l'intérieur de chaque séquence est présenté à la figure 3-14 en comparant les erreurs-types de la variable transformée. On constate que les échantillons des doses réduites possèdent un nombre de graines rarement plus important que ceux des parcelles traitées à dose pleine, mais que ce résultat varie selon chaque séquence.

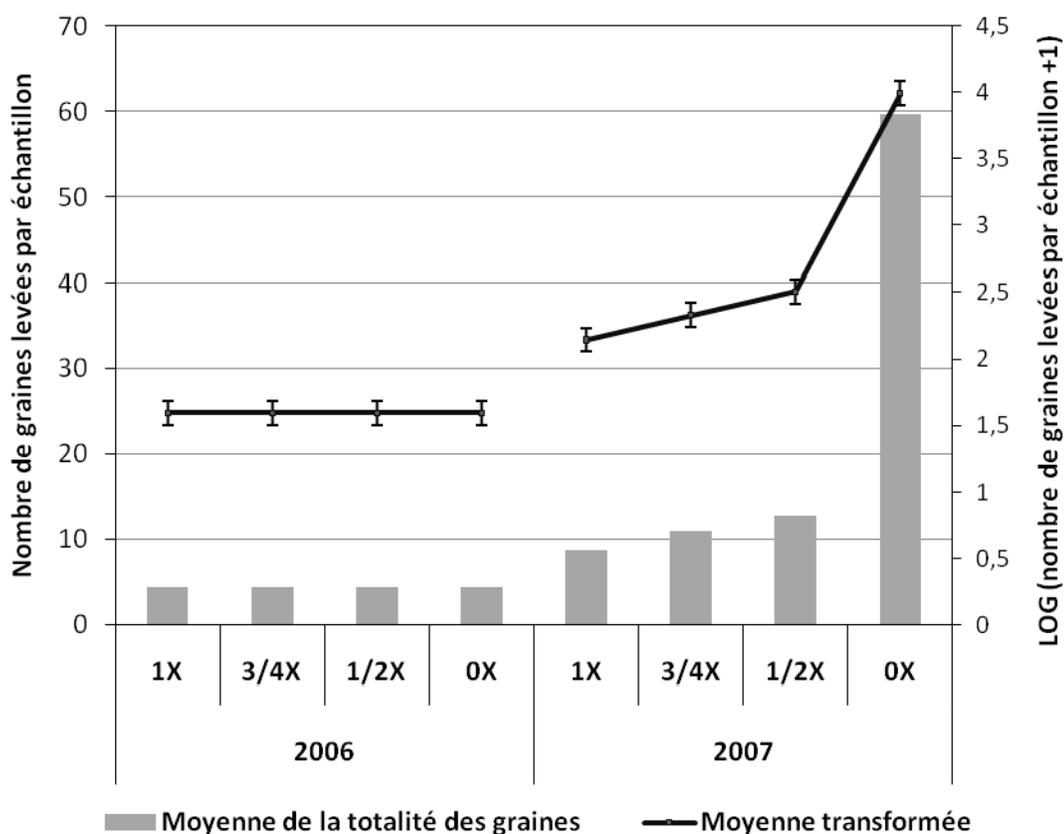


**Figure 3-13** Nombre de graines levées total par échantillon en 2006 et 2007 selon la séquence et la dose utilisée.



**Figure 3-14** Moyenne du nombre de graines levées total par échantillon selon la séquence et la dose utilisée. Moyenne des années 2006 à 2007. Un échantillon de sol représente approximativement 247g de sol sec (poids constant).

La figure 3-15 représente l'interaction de la dose suivant l'année sans tenir compte de la séquence de cultures. On constate que globalement la banque de graines a augmenté après deux années de séquences, quelle que soit la dose utilisée. La différence devient significative entre les parcelles traitées ou non avec un herbicide, mais aussi entre celles traitées à doses réduites et celles traitées à dose pleine. Ce graphique apporte une information plus claire que celui de l'effet simple de la dose (Figure 3-14).



**Figure 3-15** Moyenne du nombre total de graines par échantillon selon la dose utilisée et l'année.

*Un échantillon de sol représente approximativement 247g de sol sec (poids constant).*

L'utilisation de doses réduites semble donc inappropriée de façon globale et non pour un type de séquence ou d'herbicide particulier. L'étude des échantillons prélevés en 2008 (et non encore analysés) devrait apporter un complément d'information à ce sujet.

### 3.5 Conclusion

En écologie et plus précisément dans le domaine de la restauration des milieux, les banques de semences ont un rôle primordial pour le maintien ou la réintroduction des espèces dans un site. Elles peuvent aussi permettre de mieux comprendre la dynamique des espèces présentes sur une parcelle agricole et améliorer les programmes de gestion des mauvaises herbes (Ambrosio et coll. 2004). Dans le cas de cette étude, la banque de graines des mauvaises herbes apporte une indication supplémentaire quant à l'utilisation de doses réduites d'herbicide et la possibilité d'adopter cette pratique à moyen terme.

Les résultats concernant la méthode utilisée nous permettent de confirmer la première hypothèse de ce chapitre : la méthode mixte d'évaluation de la banque de graines (Heerdt et coll. 1996) a permis de dénombrer en moyenne au moins 80% des graines de mauvaises herbes viables (hypothèse 1). L'adaptation de cette méthode en chambre de croissance a même permis d'obtenir un taux moyen de 83% de graines viables germées. Les taux les plus bas apparaissent dans les échantillons qui correspondent aux parcelles non traitées de cette étude. La densité de graines très élevée dans ces échantillons pourrait être à l'origine de cette baisse des taux (seulement 55% de graines levées sur le total des graines viables). L'utilisation de cette méthode a permis d'améliorer le temps et l'espace nécessaire pour ce type d'analyse en comparaison avec une méthode classique de mise en germination directe des échantillons. De plus, le risque d'erreur fut grandement diminué par rapport à une méthode de séparation physique et de comptage manuel des graines, car seules les mauvaises herbes levées ont été comptabilisées.

Les pourcentages de germination ont été obtenus et vérifiés grâce à l'utilisation du test au tétrazolium sur les graines qui n'ont pas germé. Cette étape de vérification a été extrêmement longue au vu du nombre d'échantillons traités (seulement 30, en un mois) en comparaison avec le temps nécessaire pour obtenir le total des graines levées (environ deux mois). Cette étape a malgré tout été essentielle pour vérifier le succès de la méthode. En vue d'utiliser cette méthode de façon plus fréquente en malherbologie, d'autres protocoles doivent être testés, notamment sur différents cycles de température ou encore l'amélioration des méthodes de tamisage. De plus, l'échantillonnage au champ pourrait faire également

l'objet de tests supplémentaires en vue d'améliorer la détection d'espèces distribuées de façon hétérogène sur la parcelle (Benoit et coll. 1989).

Concernant l'étude quantitative de la banque de graines, l'effet dose et l'effet année sont les plus significatifs et en comparaison l'effet des séquences est faible. Dans tous les cas, la banque de graines a augmenté entre le moment où l'expérience a débuté (2006) et après deux années de cultures (fin 2007). On constate que d'un point de vue global l'utilisation deux années répétées de doses réduites augmente de façon significative la banque totale de graines présentes dans le sol. Ces conclusions réfutent les études de Sikkema et coll (2004 et 2005) qui rapportaient que l'utilisation de doses égales ou supérieures à 450g a.i. /ha de glyphosate n'entraîne pas d'augmentation significative des levées de chénopode blanc (*Chenopodium album*) ou de pied de coq (*Echinochloa crus-galli*) l'année suivant le traitement. La troisième hypothèse de ce mémoire (deuxième hypothèse de ce chapitre) est donc infirmée et l'utilisation de doses réduites paraît déconseillée ou du moins à utiliser avec prudence si les producteurs décident de les appliquer plus d'une année sur les mêmes parcelles.

Dans des études antérieures, certains chercheurs ont pu établir des corrélations entre les densités de mauvaises herbes levées et leur stock semencier (Rahman et coll. 2006). Même si les densités de mauvaises herbes ne sont pas mesurées dans cette étude, les résultats de la banque de graines sont différents des résultats de répression et de biomasse sèche des mauvaises herbes obtenus au chapitre précédent. Ce constat confirme la difficulté de prédire l'état de la banque de graines à partir de données de biomasses ou de densités (Cardina & Sparrow 1996). Les pratiques culturales mises en place sur les parcelles influencent grandement la banque de graines (Brenchley & Warington 1933) et il se pourrait que ce soit également le cas dans cette étude. Le labour en post-récolte pourrait avoir une incidence majeure sur la banque de graines et avoir enfoui la banque de graines à une profondeur plus importante que celle des échantillons. Le prélèvement des échantillons de sols a été fait à une profondeur standard de 15 cm et il est possible qu'un nombre non négligeable de graines de mauvaises herbes ne soit pas comptabilisé. L'analyse des échantillons prélevés après la troisième année de cultures pourrait en partie répondre à cette question puisque le sol aura subi deux labours depuis le premier prélèvement. La

distribution des graines dans les premiers centimètres du sol sera alors vraisemblablement modifiée et des différences plus marquées seront alors visibles entre les séquences.

Dans un autre cas, si le travail du sol n'est pas mis en cause, il est possible que la production de graines des mauvaises herbes ne soit pas proportionnelle à la biomasse globale observée pour chaque espèce dans une parcelle. Pour les graminées annuelles la compétition intra-spécifique à l'intérieur d'une parcelle pourrait entraîner une diminution de la production de graines ou une difficulté à produire des graines matures avant la fin de la saison de croissance. Si tel était le cas, les graminées auraient seulement une influence au moment de la période critique de compétition avec les cultures, entraînant une baisse des rendements (Chapitre 2), mais sans avoir un impact aussi important sur la banque de graines et sur d'éventuels problèmes dans les années futures.

En conséquence, les résultats des séquences et des herbicides utilisés semblent pour le moment trop imprécis pour émettre un avis favorable ou défavorable en faveur d'un herbicide ou d'une séquence en particulier. Seules deux tendances se dessinent : la première concerne l'utilisation répétée du glyphosate qui semble apporter des densités de graines plus faibles de dicotylédones et surtout dans les séquences où le maïs et le soya sont en rotation. La deuxième concerne l'utilisation répétée ou en première année du glufosinate qui semble apporter des densités plus fortes de graines et en particulier de dicotylédones annuelles.

Après seulement deux années d'utilisation répétée de doses réduites d'herbicide, les résultats de ce chapitre démontrent un avis défavorable à cette pratique, surtout en ce qui concerne l'utilisation du glufosinate.

### 3.6 Références bibliographiques

- Ambrosio, L., Iglesias L., Marín C. & Del Monte J.P.**, 2004. Evaluation of sampling methods and assessment of the sample size to estimate the weed seedbank in soil, taking into account spatial variability. *Weed Research*, 44, 224-236.
- Benoit, D., Kenkel, N. & Cavers, P.**, 1989. Factors influencing the precision of soil seed bank estimates. *Can. J. Bot.*, 67, 2833-2840.
- Bigwood, D.W. & Inouye, D.W.**, 1988. Spatial pattern analysis of seed banks: an improved method and optimized sampling. *Ecology*, 69, 497-507.
- Brenchley, W.E. & Warington, K.**, 1933. The Weed Seed Population of Arable Soil: II. Influence of Crop, Soil and Methods of Cultivation Upon the Relative Abundance of Viable Seeds. *The Journal of Ecology*, 21, 103-127.
- Cardina, J. & Sparrow, D.H.**, 1996. A Comparison of Methods to Predict Weed Seedling Populations from the Soil Seedbank. *Weed Science*, 44, 46-51.
- Dong-Sheng, T., Muhammad, H., Young-Moon, K., Yi-Ping, Z., Sang-Mo, K., & In-Jung, L.**, 2008. Role of Red Light, Temperature, Stratification and Nitrogen in Breaking Seed Dormancy of *Chenopodium album* L. *J. Crop Sci. Biotech.*, 11, 199-204
- Ellis, R., Hong, T. & Roberts, E.**, 1985. Handbooks for Genebanks No.2. Handbook of Seed Technology for Genebanks Vol. I. Principles and Methodology International board for plant genetic resources., Rome.
- Guyot, A.L.**, 1962. Semences et plantules des principales mauvaises herbes ACTA., PARIS: La Maison Rustique.
- Heerdt, G.N.J.T., Verweij, G. L., Bekker, R. M. & Bakker J. P.**, 1996. An Improved Method for Seed-Bank Analysis: Seedling Emergence After Removing the Soil by Sieving. *Functional Ecology*, 10, 144-151.
- Ishikawa-Goto, M. & Tsuyuzaki, S.**, 2004. Methods of estimating seed banks with reference to long-term seed burial. *Journal of Plant Research*, 117, 245-248.

- Rahman, A., James, T.K. & Grbavac, N.**, 2006. Correlation between the soil seed bank and weed populations in maize fields. *Weed Biology and Management*, 6, 228-234.
- Rahman, A., James, T.K. & Grbavac, N.**, 2001. Potential of weed seedbanks for managing weeds: a review of recent New Zealand research. *Weed Biology and Management*, 1, 89-95.
- Roberts, H.**, 1981. Seed banks in soil. *Advances in Applied Biology*, 6, 1-56.
- Sawma, J.T. & Mohler, C.L., 2002. Evaluating Seed Viability by an Unimbibed Seed Crush Test in Comparison with the Tetrazolium Test. *Weed Technology*, 16, 781-786.
- Sikkema, P.H. et coll.**, 2005. Response of Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) to Glyphosate Application Timing and Rate in Glyphosate-Resistant Corn (*Zea mays*)1. *Weed Technology*, 19, 830-837 .
- Sikkema, P.H. et coll.**, 2004. Response of Common Lambsquarters (*Chenopodium album*) to Glyphosate Application Timing and Rate in Glyphosate-Resistant Corn. *Weed Technology*, 18, 908-916.
- Thibault, P.**, 2006. Doses réduites d'herbicides. *Clubs conseils en agroenvironnement*. [En ligne] <http://www.clubsconseils.org/accueil/affichage.asp?B=767> [Accédé le 24 janvier 2009].

## Discussion générale et conclusions

La nécessité d'une gestion préventive de la résistance chez les mauvaises herbes paraît aujourd'hui une priorité, tout particulièrement dans les systèmes de culture utilisant les herbicides non sélectifs. Le succès connu au cours des dix dernières années pour ce type de culture, et plus spécialement pour les cultures tolérantes au glyphosate, s'en trouve compromis dans plusieurs régions du monde. Seule une stratégie à long terme, menée conjointement par les fabricants et les producteurs, peut permettre de limiter le problème.

La solution la plus simple pour les producteurs consisterait à utiliser le glufosinate d'ammonium en alternance avec le glyphosate. Les résultats de cette étude montrent que cette possibilité présente certaines limites, dues notamment au manque d'efficacité du glufosinate sur les espèces de graminées annuelles. Sur les huit séquences culturales que comportait cette étude, celles utilisant trois ou deux années consécutives le glufosinate, ont montré en moyenne des répressions diminuées, des biomasses sèches de mauvaises herbes plus importantes et des rendements significativement inférieurs par rapport aux séquences de référence n'utilisant que le glyphosate. L'utilisation des deux herbicides alternativement une année sur deux serait le seul compromis acceptable de cette étude, avec malgré tout une baisse des rendements possible, toujours liée à la flore des graminées annuelles. Les séquences : maïs glufosinate (LL)-maïs glyphosate (RR)-maïs glufosinate (LL) et maïs glufosinate (LL)-soya glyphosate (RR)-maïs glufosinate (LL), sont celles qui permettraient de prévenir la résistance des mauvaises herbes (grâce à l'alternance des modes d'action des deux herbicides) tout en préservant au maximum les rendements des cultures. La première hypothèse de cette étude est donc infirmée. Le glufosinate ne peut pas remplacer aussi efficacement le glyphosate que ce soit en monoculture de maïs ou dans une rotation maïs-soya.

Dans les séquences où le maïs tolérant au glufosinate est répété deux années de suite, le remplacement du maïs tolérant au glyphosate par le soya tolérant au glyphosate n'apporte aucun changement en termes de répression ou de biomasse des mauvaises herbes. Cette remarque est valable dans toutes les autres séquences culturales utilisant le soya RR. La

seconde hypothèse de cette étude est donc confirmée. Le remplacement d'un maïs traité au glyphosate par un soya traité avec ce même herbicide n'entraîne pas de différences significatives quelle que soit la variable étudiée.

Les séquences utilisant le glyphosate en continu en monoculture de maïs ou en rotation maïs-soya se sont révélées les plus intéressantes de cette étude, grâce aux excellentes répressions et aux bons rendements obtenus. Ceci confirme leur attrait auprès des producteurs et parallèlement la difficulté de faire adopter une alternative qui risque de les pénaliser. Cela est d'autant plus difficile, puisqu'aucun cas de résistance au glyphosate n'est encore apparu au Québec à la fin de cette étude et de ce fait la nécessité d'un changement ne semble pas être une priorité malgré les nombreux avertissements de la communauté scientifiques au cours des dernières années.

Les solutions alternatives, proposées par les fabricants, vont être progressivement mises en place au Québec au cours des prochaines années. Il s'agit de l'arrivée sur le marché de cultivars de soya tolérant le glufosinate et le dicamba. Ces deux herbicides permettraient aux producteurs d'alterner plus facilement les matières actives autres que le glyphosate, surtout chez les producteurs utilisant les cultures de maïs RR – soya RR en continu.

La réduction de dose d'herbicide fut la deuxième problématique de cette étude. Le centre de lutte antiparasitaire canadien souhaitant développé des stratégies phytosanitaires plus respectueuses de l'environnement et économiquement viables, le professeur Gilles D. Leroux a proposé l'application de doses réduites aux séquences de cette étude. Ce type de stratégie est perçu différemment suivant que l'on se place du côté du producteur, du fabricant, de l'agronome, du chercheur, ou encore de l'assureur des récoltes. L'utilisation de doses réduites est déjà bien implantée au Québec, mais les effets à long et moyen terme de cette pratique restent encore faiblement documentés, tout particulièrement sur l'effet cumulatif dans la banque de graines des mauvaises herbes.

Les résultats de cette étude ont démontré le faible potentiel du glufosinate dans cette stratégie. Dans toutes les séquences utilisant cet herbicide (trois, deux ou une année), l'effet de réduction de doses vient aggraver les problèmes de répression et de rendements des

cultures. Une recommandation de réduction de doses de cet herbicide ne semble être réalisable en présence de plusieurs espèces problématiques sur la parcelle. Concernant le glyphosate, une possible réduction de dose d'un quart voir de la moitié de la dose homologuée semble avoir un faible impact sur la répression des mauvaises herbes, sauf l'herbe à poux. De plus, les rendements des cultures ne diminuent significativement qu'à demi-dose en comparaison à la dose homologuée sur la moyenne d'une séquence de trois années.

La réduction de dose d'herbicide est un sujet complexe d'un point de vue agronomique, mais aussi d'un point de vue juridique. Dans le champ, l'emploi de doses réduites est très dépendant des conditions de l'année en cours, de la flore présente et aussi de l'herbicide utilisé. Ce constat amène donc à suivre des recommandations élémentaires comme le présente Thibault (2006) :

*« Le producteur combine l'utilisation des doses réduites à des techniques de lutte intégrée telles que :*

- *le dépistage hebdomadaire des champs pendant la période propice au traitement*
- *les méthodes de désherbage mécanique*
- *le réglage du pulvérisateur*

*Le producteur peut également effectuer des applications localisées en fonction du degré d'infestation dans certaines parties du champ. Le producteur applique alors une dose réduite sur les superficies peu infestées et une dose conforme à l'étiquette pour les parties du champ infestées ».*

De plus, malgré ces recommandations, aucun résultat ne sera garanti par le fabricant de l'herbicide utilisé à dose réduite. De même, l'assurance des récoltes s'en trouvera annulée si des pertes de rendements semblent liées à cette pratique. L'agriculteur prend donc un risque non négligeable et une solution de secours (traitement de rattrapage, lutte mécanique, etc.) doit être envisagée pour limiter au maximum les risques. Enfin, malgré toutes ces précautions, une utilisation répétée de l'usage de doses réduites d'herbicide pourrait avoir un impact sur la banque de semence de mauvaises herbes dans le sol, notamment celle des graminées annuelles.

Dans le cas de cette étude, la banque de graines des mauvaises herbes apporte une indication supplémentaire quant à l'utilisation de doses réduites d'herbicide et la possibilité

d'adopter cette pratique à moyen terme. Des prélèvements de sols ont été effectués avant (2006) et après deux années de séquences (fin 2007) dans toutes les parcelles de cette étude pour mesurer des différences quantitatives. Le prélèvement de la troisième année était toujours en cours d'étude au moment du dépôt de ce mémoire.

Durant cette partie de l'étude, nous avons eu l'occasion d'utiliser une méthode alternative de quantification. Cette méthode a permis de réduire considérablement le temps et l'espace nécessaires à la mesure de ce type de variable. Deux étapes principales ont permis cette quantification. Premièrement une étape de concentration du sol qui a permis de réduire de plus de moitié les échantillons de sols. La deuxième étape fut la mise en germination des échantillons concentrés. Suite à cette étape menée en chambre de croissance et après vérification avec un test au tétrazolium, cette méthode a même permis d'obtenir un taux moyen de 83% de graines viables germées.

Les résultats de l'étude quantitative de la banque de graines montrent que l'effet dose et l'effet année sont les plus significatifs et en comparaison l'effet des séquences est faible voire inexistant. Dans tous les cas, la banque de graines a augmenté entre le moment où l'expérience a débuté et après deux années de cultures. On constate que d'un point de vue global l'utilisation deux années répétées de doses réduites semble augmenter de façon significative la banque de graines totale présente dans le sol. L'hypothèse 3 de cette étude est donc infirmée et l'utilisation de doses réduites paraît déconseillée ou du moins à utiliser avec prudence si les producteurs décident de les appliquer plus d'une année sur les mêmes champs.

L'effet des séquences culturales et des herbicides sur la banque de graines, est pour le moment trop imprécis pour émettre un avis favorable ou défavorable en faveur d'un herbicide ou d'une séquence en particulier. Seules deux tendances se dessinent : la première concerne l'utilisation répétée du glyphosate qui semble apporter des densités de graines moins importantes surtout dans les séquences où le maïs et le soya sont en rotation. La deuxième concerne l'utilisation deux années de suite ou une seule fois en début de séquence du glufosinate qui semble apporter des densités plus importantes de graines et en particulier celles des espèces de dicotylédones annuelles.

À la lumière des résultats présentés, l'emploi du glufosinate en remplacement du glyphosate paraît difficilement envisageable, en raison notamment des problèmes de répressions et des baisses de rendements encourus dans le cas de forte pression de mauvaises herbes et de flore mixte (présence de graminées annuelles). L'utilisation de doses réduites de glufosinate n'est pas conseillée pour les mêmes raisons. Concernant le glyphosate une réduction d'un quart de la dose homologuée semble réalisable du point de vue des rendements des cultures, mais présente toutefois un risque d'augmentation de la banque de graines au bout de deux années d'utilisation répétée.

## **ANNEXES**

## Annexe 2.1 Données météorologiques en 2006

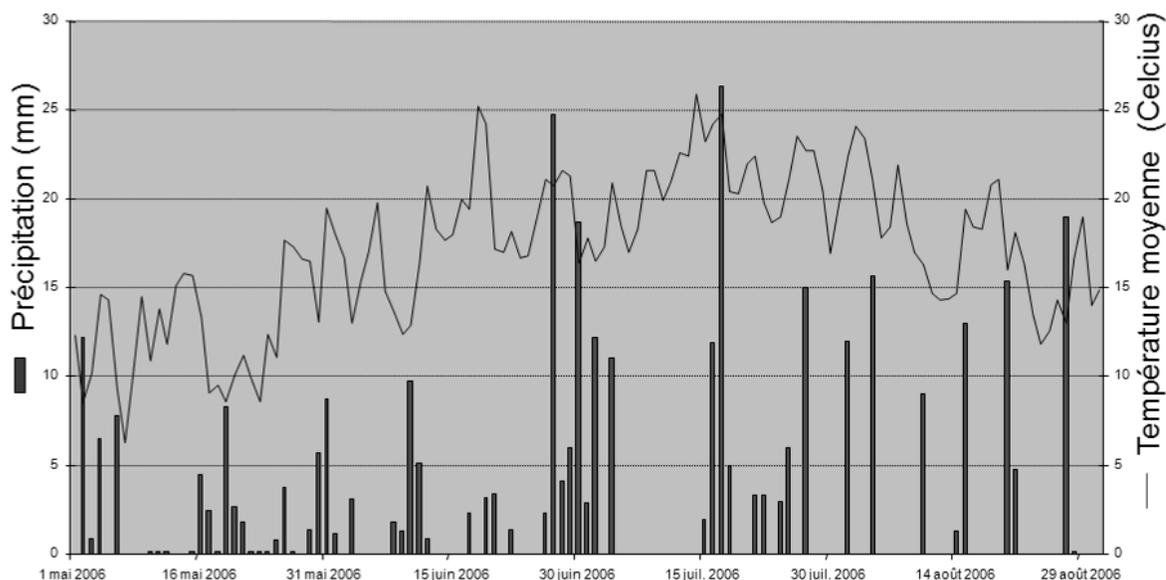
Données météorologiques à l'aéroport Jean-Lesage en 2006  
(Tiré des sommaires météorologiques mensuels d'Environnement-Canada).

Mois	Degrés-jours de croissance <sup>†</sup>		Précipitations (mm)	
	2006	Normale*	2006	Normale*
Mai	233,1	198,9	68,5	106,1
Juin	389,4	343,4	89,4	114,2
Juillet	488,4	441,2	101,9	127,8
Août	382,3	400,1	90,4	116,7
Septembre	238,5	224,3	119,5	125,5
Octobre	67,9	67,7	234,5	101,7
Total depuis Mai	1799,6	1675,6	704,2	692

Latitude = 46°47' nord ; Longitude = 71°23' ouest ; Altitude = 70 m

<sup>†</sup> : Base de 5°C

\*Normale climatique de 1971-2000



Pluviométrie & Température en 2006  
Station agronomique de l'Université Laval à Saint-Augustin-de-Desmaures

## Annexe 2.2 Données météorologiques en 2007

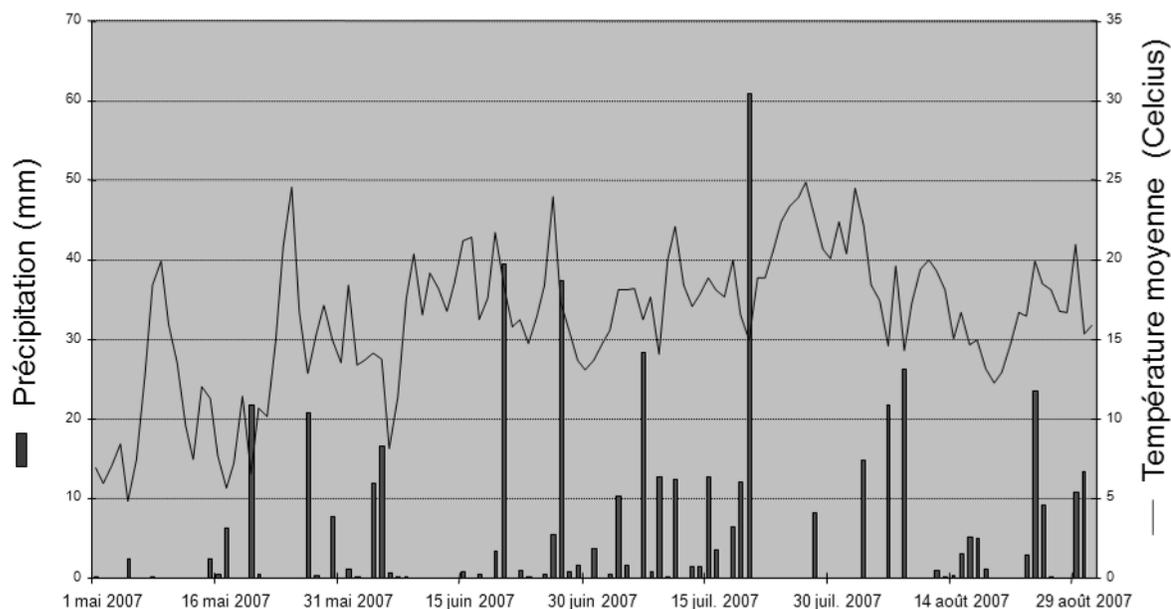
Données météorologiques à l'aéroport Jean-Lesage en 2007  
(Tiré des sommaires météorologiques mensuels d'Environnement-Canada).

Mois	Degrés-jours de croissance <sup>†</sup>		Précipitations (mm)	
	2007	Normale*	2007	Normale*
Mai	218,1	198,9	62,6	106,1
Juin	352,7	343,4	120,7	114,2
Juillet	432,4	441,2	177,5	127,8
Août	380,8	400,1	138,6	116,7
Septembre	272	224,3	110,5	125,5
Octobre	138,5	67,7	98,9	101,7
Total depuis Mai	1794,5	1675,6	708,8	692

Latitude = 46°47' nord ; Longitude = 71°23' ouest ; Altitude = 70 m

<sup>†</sup> : Base de 5°C

\*Normale climatique de 1971-2000



Pluviométrie & Température en 2007  
Station agronomique de l'Université Laval à Saint-Augustin-de-Desmaures

## Annexe 2.3 Données météorologiques en 2008

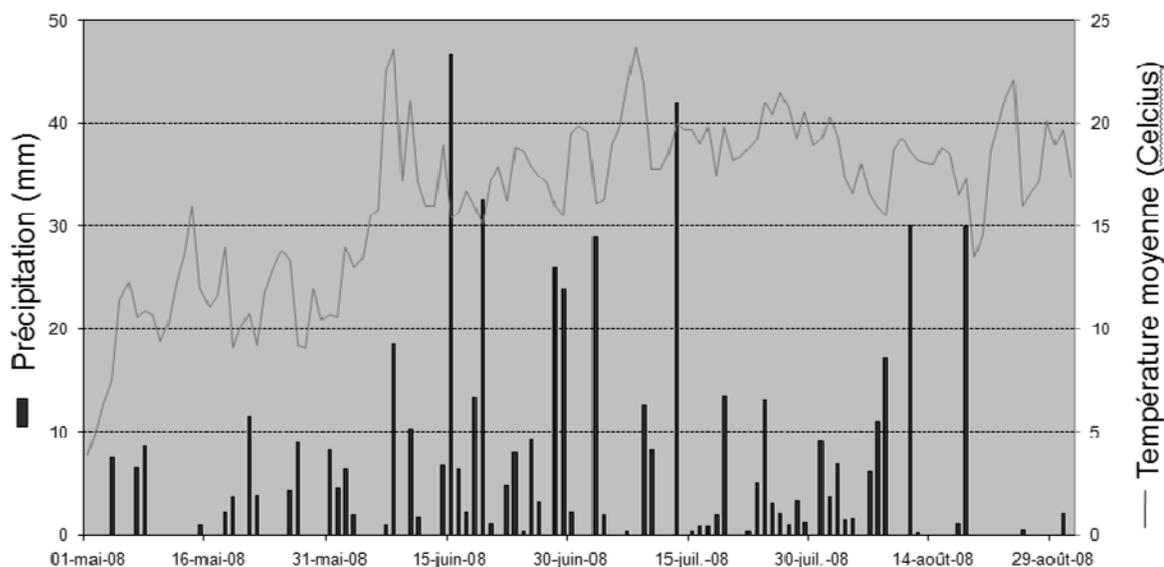
Données météorologiques à l'aéroport Jean-Lesage en 2007  
(Tiré des sommaires météorologiques mensuels d'Environnement-Canada).

Mois	Degrés-jours de croissance <sup>†</sup>		Précipitations (mm)	
	2008	Normale*	2008	Normale*
Mai	176,7	198,9	66,4	106,1
Juin	355,7	343,4	231,2	114,2
Juillet	448,8	441,2	149,8	127,8
Août	402,7	400,1	111,8	116,7
Septembre	267	224,3	100,5	125,5
Octobre	51,2	67,7	105,7	101,7
Total depuis Mai	1702,1	1675,6	765,4	692

Latitude = 46°47' nord ; Longitude = 71°23' ouest ; Altitude = 70 m

<sup>†</sup> : Base de 5°C

\*Normale climatique de 1971-2000

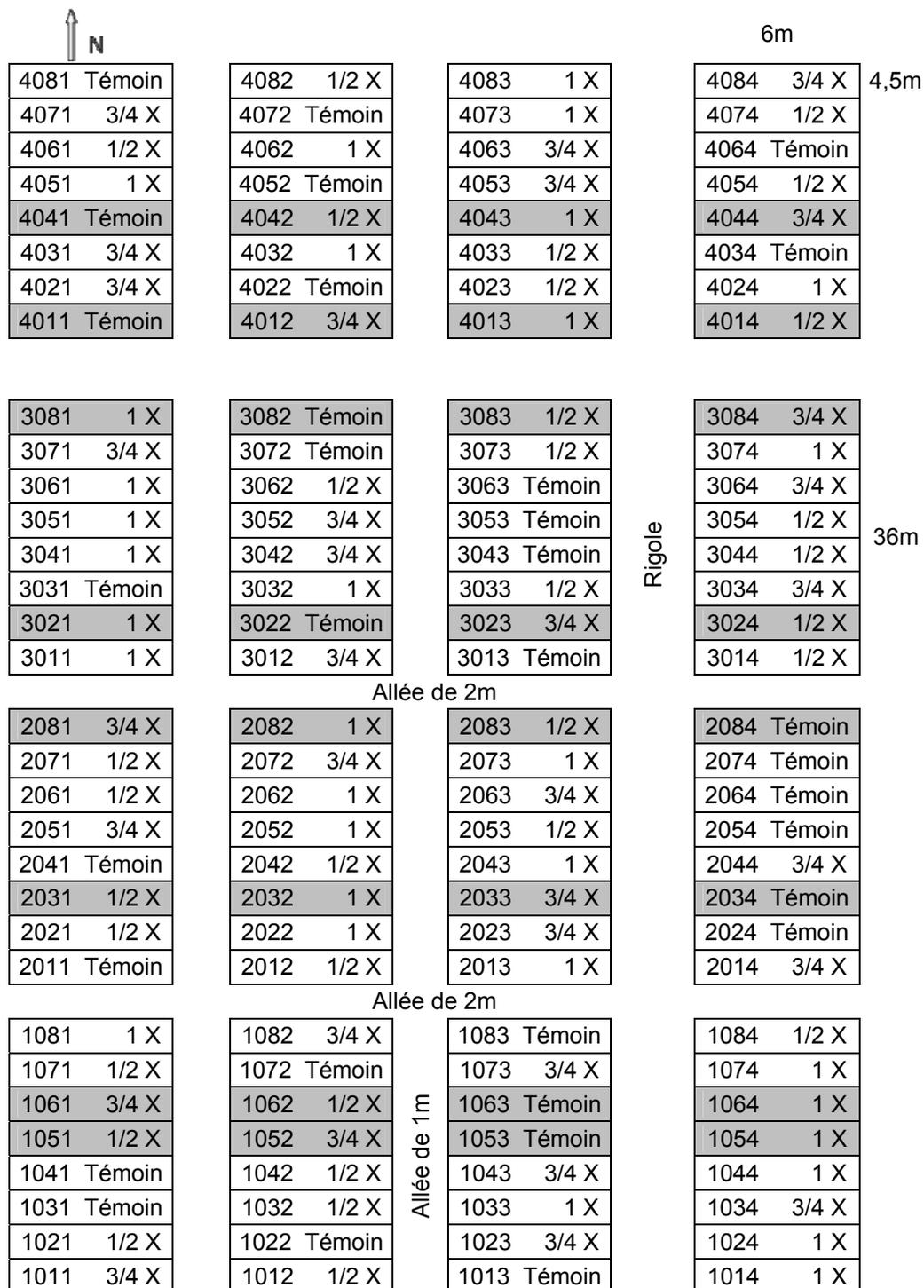


Pluviométrie & Température en 2008  
Station agronomique de l'Université Laval à Saint-Augustin-de-Desmaures

## Annexe 2.4 Protocole expérimental

Séquence	Culture en 2006	Traitement	Stade	Dose kg/ha	Préparation	Culture en 2007	Traitement	Stade	Dose kg/ha	Préparation	Culture en 2008	Traitement	Stade	Dose kg/ha	Préparation
1. MRR-MRR-MRR	Maïs RR					Maïs RR					Maïs RR				
	0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé			
	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL
	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL
	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL
2. MRR-MLL-MLL	Maïs RR					Maïs LL					Maïs LL				
	0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé			
	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN
	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN
	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN
3. MRR-SRR-MRR	Maïs RR					Soya RR					Maïs RR				
	0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé			
	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL
	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL
	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL
4. MLL-MLL-MLL	Maïs LL					Maïs LL					Maïs LL				
	0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé			
	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN
	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN
	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN
5. MLL-MRR-MLL	Maïs LL					Maïs RR					Maïs LL				
	0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé			
	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN
	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN
	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN
6. MLL-SRR-MLL	Maïs LL					Soya RR					Maïs LL				
	0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé			
	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN
	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN
	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN
7. SRR-MRR-MRR	Soya RR					Maïs RR					Maïs RR				
	0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé			
	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL
	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL
	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL
8. SRR-MLL-MLL	Soya RR					Maïs LL					Maïs LL				
	0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé				0 X	Témoin enherbé			
	1/2 X	Glyphosate	POST	0,45	540 SL	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN	1/2 X	Glufosinate	POST	0,25	200 SN
	3/4 X	Glyphosate	POST	0,68	540 SL	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN	3/4 X	Glufosinate	POST	0,38	200 SN
	1 X	Glyphosate	POST	0,9	540 SL	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN	1 X	Glufosinate	POST	0,5	200 SN

## Annexe 2.5 Schéma du plan de champ



## Annexe 2.6 Calendrier des évaluations réalisées au champ

Pour le maïs :

### Évaluations réalisées en 2006

Période	T0	2 SAT <sup>2</sup>	5 SAT	8 SAT	16 SAT	Récolte
Phytotoxicité	-	4 / 07	27 / 07	15 / 08	-	-
Recouvrement	12 / 06	4 / 07	27 / 07	15 / 08	-	-
Efficacité	-	4 / 07	27 / 07	15 / 08	-	-
Biomasse	-	-	-	04 / 08	27 / 09	-
Rendement	-	-	-	-	-	30 / 10

### Évaluations réalisées en 2007

Période	T0	2 SAT <sup>2</sup>	5 SAT	8 SAT	16 SAT	Récolte
Phytotoxicité	-	22 / 06	11 / 07	03 / 08	-	-
Recouvrement	08 / 06	22 / 06	11 / 07	03 / 08	-	-
Efficacité	-	22 / 06	11 / 07	03 / 08	-	-
Biomasse	-	-	-	06 / 08	01 / 10	-
Rendement	-	-	-	-	-	26 / 10

### Évaluations réalisées en 2008

Période	T0	2 SAT <sup>2</sup>	5 SAT	8 SAT	16 SAT	Récolte
Phytotoxicité	-	25 / 06	15 / 07	27 / 07	-	-
Recouvrement	12 / 06	25 / 06	15 / 07	27 / 07	-	-
Efficacité	-	25 / 06	15 / 07	27 / 07	-	-
Biomasse	-	-	-	25 / 07	25 / 09	-
Rendement	-	-	-	-	-	23 / 10

<sup>1</sup> T : traitement

<sup>2</sup> SAT : Semaine après traitement

Pour le soya :

**Évaluations réalisées en 2006**

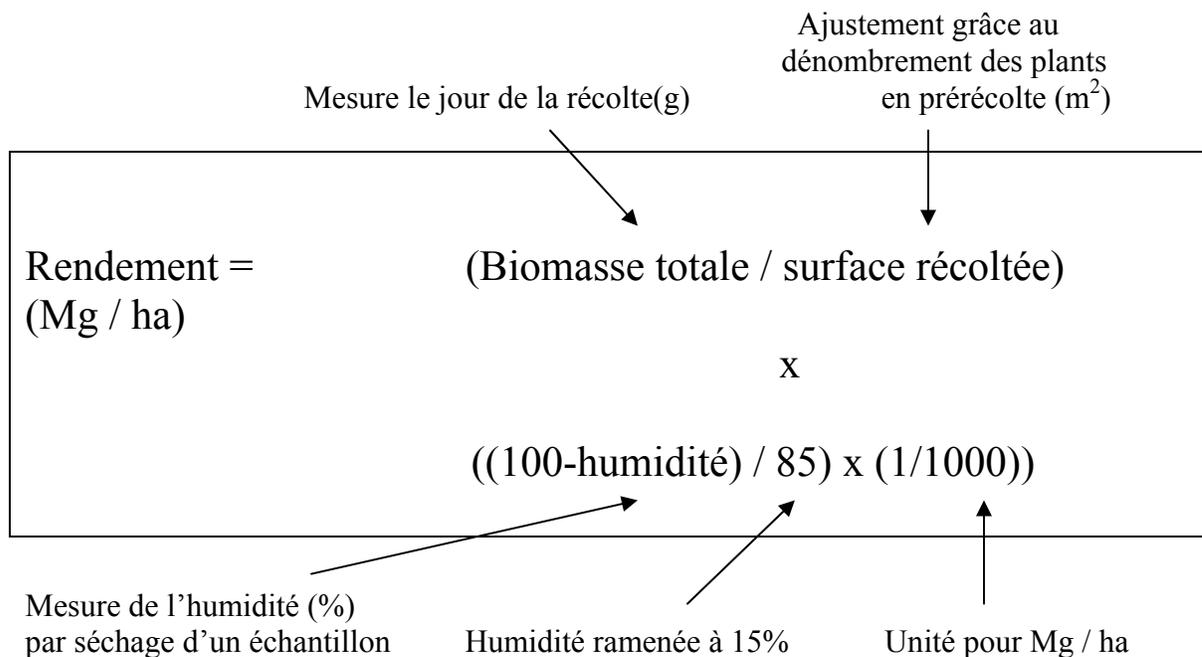
<b>Période</b>	<b>T0</b>	<b>2 SAT<sup>2</sup></b>	<b>5 SAT</b>	<b>8 SAT</b>	<b>16 SAT</b>	<b>Récolte</b>
Phytotoxicité	-	4 / 07	27 / 07	15 / 08	-	-
Recouvrement	21 / 06	4 / 07	27 / 07	15 / 08	-	-
Efficacité	-	4 / 07	27 / 07	15 / 08	-	-
Biomasse	-	-	-	04 / 08	27 / 09	-
Rendement	-	-	-	-	-	05 / 10

**Évaluations réalisées en 2007**

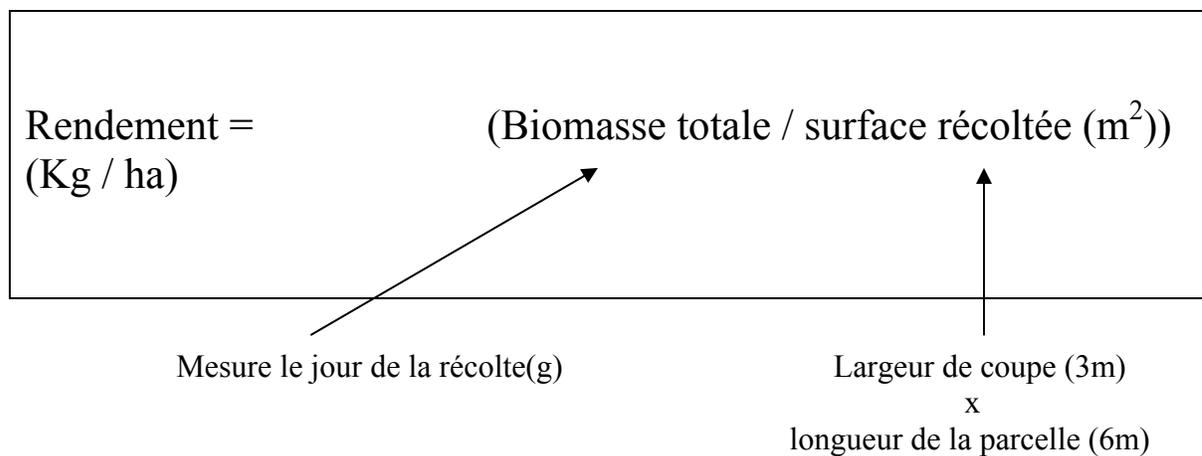
<b>Période</b>	<b>T0</b>	<b>2 SAT<sup>2</sup></b>	<b>5 SAT</b>	<b>8 SAT</b>	<b>16 SAT</b>	<b>Récolte</b>
Phytotoxicité	-	06 / 07	27 / 07	03 / 08	-	-
Recouvrement	22 / 06	06 / 07	27 / 07	03 / 08	-	-
Efficacité	-	06 / 07	27 / 07	03 / 08	-	-
Biomasse	-	-	-	06 / 08	01 / 10	-
Rendement	-	-	-	-	-	07 / 10

## Annexe 2.7 Calcul du rendement

### Pour la culture du maïs :



### Pour la culture du soya :



## Annexe 2.8 Calcul du rendement relatif

**En 2006 :** pour le maïs et le soya, les parcelles traitées à la dose pleine de glyphosate étaient les références.

Pour le maïs :

Rép.	Séquence référence	Dose référence	Année	Parcelle	Rendement
1	MRR-MLL-MLL	1 X	2006	1033	10,59
1	MRR-SRR-MRR	1 X	2006	1064	9,43
1	MRR-MRR-MRR	1 X	2006	1074	9,61
2	MRR-MRR-MRR	1 X	2006	2013	10,57
2	MRR-SRR-MRR	1 X	2006	2032	10,32
2	MRR-MLL-MLL	1 X	2006	2062	9,63
3	MRR-MLL-MLL	1 X	2006	3011	10,69
3	MRR-MRR-MRR	1 X	2006	3051	10,74
3	MRR-SRR-MRR	1 X	2006	3081	10,76
4	MRR-SRR-MRR	1 X	2006	4013	10,55
4	MRR-MLL-MLL	1 X	2006	4024	9,41
4	MRR-MRR-MRR	1 X	2006	4032	10,47
<b>Moyenne de référence =</b>					<b>10,23 Mg/ha</b>

Pour le soya :

Rép.	Séquence référence	Dose référence	Année	Parcelle	Rendement
1	SRR-MLL-MLL	1 X	2006	1014	3590,56
1	SRR-MRR-MRR	1 X	2006	1081	3865,56
2	SRR-MRR-MRR	1 X	2006	2043	4243,33
2	SRR-MLL-MLL	1 X	2006	2073	4304,44
3	SRR-MLL-MLL	1 X	2006	3032	4113,33
3	SRR-MRR-MRR	1 X	2006	3074	3722,78
4	SRR-MLL-MLL	1 X	2006	4051	3271,11
4	SRR-MRR-MRR	1 X	2006	4062	3739,44
<b>Moyenne de référence =</b>					<b>3856,32 Kg/ha</b>

Exemple de calcul en 2006 pour une parcelle de maïs:

Rép.	Séquence	Dose	Année	Parcelle	Rendement
1	MLL-MLL-MLL	1/2 X	2006	1021	10,01

$$\text{Rendement relatif} = (10,01 \text{ (rendement réel)} / 10,23 \text{ (rendement de référence)}) \times 100$$

$$= 97,86 \%$$

**En 2007 :** pour le maïs les parcelles traitées au glyphosate deux années de suite à dose pleine et pour le soya celles de la séquence maïs-soya glyphosate traitées à dose pleine, étaient les parcelles de références.

Pour le maïs :

Rép.	Séquence référence	Dose référence	Année	Parcelle	Rendement
1	MRR-MRR-MRR	1 X	2007	1074	10,41
2	MRR-MRR-MRR	1 X	2007	2013	10,94
3	MRR-MRR-MRR	1 X	2007	3051	13,29
4	MRR-MRR-MRR	1 X	2007	4032	13,78
<b>Moyenne de référence =</b>					<b>12,10 Mg/ha</b>

Pour le soya :

Rép.	Séquence référence	Dose référence	Année	Parcelle	Rendement
1	MRR-SRR-MRR	1 X	2007	1064	4109,44
2	MRR-SRR-MRR	1 X	2007	2032	3252,22
3	MRR-SRR-MRR	1 X	2007	3081	2897,22
4	MRR-SRR-MRR	1 X	2007	4013	3842,22
<b>Moyenne de référence =</b>					<b>3519,17 Kg/ha</b>

Exemple de calcul en 2007 pour une parcelle de soya :

Rép.	Séquence	Dose	Année	Parcelle	Rendement
4	MLL-SRR-MLL	1/2 X	2007	4042	3123,33

$$\text{Rendement relatif} = (3123,33 \text{ (rendement réel)} / 3519,17 \text{ (rendement de référence)}) \times 100$$

$$= 88,75 \%$$

**En 2008 :** les parcelles de la séquence de maïs trois années de suite, traitées au glyphosate à dose pleine étaient les parcelles de référence.

Pour le maïs :

Rép.	Séquence référence	Dose référence	Année	Parcelle	Rendement
1	MRR-MRR-MRR	1 X	2008	1074	4,29
2	MRR-MRR-MRR	1 X	2008	2013	5,93
3	MRR-MRR-MRR	1 X	2008	3051	5,83
4	MRR-MRR-MRR	1 X	2008	4032	4,25
<b>Moyenne de référence =</b>					<b>5,08 Mg/ha</b>

Exemple de calcul en 2006 pour une parcelle de maïs:

Rép.	Séquence	Dose	Année	Parcelle	Rendement
2	MLL-MLL-MLL	1/2 X	2008	2053	3,36

**Rendement relatif** =  $(3,36 \text{ (rendement réel)} / 5,08 \text{ (rendement de référence)}) \times 100$   
**= 66,14 %**

## Annexe 2.9 Matrice des coefficients des contrastes

	1	2	3	4	5	6	7	8
	MRR	MRR	MRR	MLL	MLL	MLL	SRR	SRR
	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Séquences culturales</b>	MRR	MLL	SRR	MLL	MRR	SRR	MRR	MLL
	-	-	-	-	-	-	-	-
	MRR	MLL	MRR	MLL	MLL	MLL	MRR	MLL

### Hypothèse n°1

le glufosinate peut remplacer le glyphosate

#### En monoculture :

Remplacement sur 3 ans	1 vs 4	+1	0	0	-1	0	0	0	0
Remplacement sur 2 ans avec RR en début de rotation	1 vs 2	+1	-1	0	0	0	0	0	0
Remplacement sur 2 ans avec RR en milieu de rotation	1 vs 5	+1	0	0	0	-1	0	0	0

#### En rotation :

Remplacement sur 2 ans avec soya en début de rotation	7 vs 8	0	0	0	0	0	0	+1	-1
Remplacement sur 2 ans avec soya en milieu de rotation	3 vs 6	0	0	+1	0	0	-1	0	0

### Hypothèse n°2

Le choix de la culture (maïs ou soya) n'influence pas la répression des mauvaises herbes

#### Avec seulement du glyphosate

Influence du soya en début de rotation	1 vs 7	+1	0	0	0	0	0	-1	0
Influence du soya en milieu de rotation	1 vs 3	+1	0	-1	0	0	0	0	0

#### Dans une rotation incluant les deux herbicides

Roundup en début de rotation	2 vs 8	0	+1	0	0	0	0	0	-1
Roundup en milieu de rotation	5 vs 6	0	0	0	0	+1	-1	0	0

## Annexe 2.10 Programmation détaillée de l'analyse statistique dans le logiciel SAS®

```

options linesize=110 pagesize=52;
run;

TITLE Impression des donnees;
proc print data= variable;
quit;

proc mixed data= variable;
CLASS bloc séquence dose annee;
MODEL Comp1= séquence |dose|annee / outp=residus;
RANDOM bloc bloc* séquence bloc*séquence*dose;
REPEATED annee / SUBJECT=bloc*dose* séquence TYPE=AR(1);

contrast '1' séquence +1 0 0 0 -1 0 0 0;
contrast '2' séquence 0 0 0 -1 +1 0 0 0;
contrast '3' séquence 0 -1 0 0 +1 0 0 0;
contrast '4' séquence 0 0 0 0 0 0 -1 +1;
contrast '5' séquence 0 0 -1 0 0 +1 0 0;
contrast '6' séquence 0 0 0 0 +1 0 0 -1;
contrast '7' séquence 0 0 0 0 +1 -1 0 0;
contrast '8' séquence 0 0 0 +1 0 0 -1 0;
contrast '9' séquence 0 +1 -1 0 0 0 0 0;

lsmeans dose/ pdiff;
lsmeans dose*séquence / pdiff;
lsmeans séquence*temps*dose/ pdiff;
ODS output lsmeans=lsm;
ODS output DIFFS=diffs;
run;

proc gplot data=residus;
plot resid*pred /vref=0;
run;

Proc univariate normal plot data=residus;
var resid;
histogram /normal;
probplot / normal;
inset N normalTest Pnormal;
run;

```

## Annexe 2.11 Analyses statistiques pour le recouvrement des mauvaises herbes

		Recouvrement global moyen des mauvaises herbes (%)															
		TO				2 SAT				5 SAT				8 SAT			
<b>Test sur les effets fixes</b>		d.l		F		F		F		F		F		F			
Séquences	7	3.87	**	106.17	***	45.27	***	152.95	***								
Doses	3	87.69	***	1979.98	***	2223.90	***	885.06	***								
Séquences*Doses	21	2.35	**	16.55	***	14.25	***	18.10	***								
Années	2	532.77	***	69.42	***	146.44	***	490.77	***								
Séquences*Années	14	4.82	***	39.51	***	52.18	***	157.63	***								
Doses*Années	6	64.47	***	14.94	***	23.59	***	49.95	***								
Séquences*Doses*Années	42	1.98	***	6.25	***	7.88	***	19.15	***								
<b>Contrastes à priori</b>		%		%		F		%		%		F		%			
MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	45 vs 48	0.48	35 vs 39	299.96	***	43 vs 53	141.05	***	46 vs 55	386.76	***						
MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	45 vs 45	0.46	35 vs 31	78.44	***	43 vs 46	69.13	***	46 vs 49	219.65	***						
MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	45 vs 55	0.86	35 vs 39	144.47	***	43 vs 44	50.08	***	46 vs 49	125.41	***						
SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	45 vs 44	0.18	33 vs 27	85.23	***	45 vs 26	73.07	***	49 vs 27	223.14	***						
MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	46 vs 52	1.35	26 vs 26	236.99	***	27 vs 27	56.77	***	28 vs 29	139.18	***						
MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	45 vs 44	0.70	35 vs 27	1.40		43 vs 26	0.25		46 vs 27	25.37	***						
MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	45 vs 52	3.11	35 vs 26	17.00	***	43 vs 27	0.01		46 vs 29	5.75	*						
MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	45 vs 45	0.07	31 vs 33	2.58		46 vs 45	0.08		49 vs 49	24.20	***						
MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	55 vs 46	14.85	39 vs 26	0.56		44 vs 27	0.13		49 vs 28	3.24							
<b>Effet simple de la dose par séquence</b>		1 X	3/4 X	1/2 X	0 X	1 X	3/4 X	1/2 X	0 X	1 X	3/4 X	1/2 X	0 X	1 X	3/4 X	1/2 X	0 X
MLL-MLL-MLL	41	47	39	64	10	19	35	93	25	41	55	91	34	42	54	89	
MLL-MRR-MLL	34	40	41	64	7	14	27	93	20	22	36	93	24	28	39	92	
MLL-SRR-MLL	44	48	57	69	9	20	30	97	18	26	37	93	26	34	43	93	
MRR-MLL-MLL	36	42	36	64	6	9	16	93	17	31	42	93	20	38	46	92	
MRR-MRR-MRR	39	47	34	64	2	3	5	93	4	6	8	92	4	7	12	91	
MRR-SRR-MRR	43	47	48	69	1	1	7	97	3	5	9	93	5	8	12	92	
SRR-MLL-MLL	44	35	44	56	6	10	15	96	19	26	40	94	24	34	44	93	
SRR-MRR-MRR	38	39	42	56	2	4	6	96	2	3	6	94	3	4	8	93	

\*P≤0,05 \*\*P≤0,01 \*\*\*P&lt;0,0001

\*P≤0,05 \*\*P≤0,01 \*\*\*P&lt;0,0001

## Annexe 2.12 Analyses statistiques pour la répression de *Chenopodium album*

### Répression de *Chenopodium album* L. en %

		2 SAT		5 SAT		8 SAT							
<b>Test sur les effets fixes</b>	<b>d.l</b>	<b>F</b>		<b>F</b>		<b>F</b>							
Séquences	7	4.40	*	12.08	***	10.05	***						
doses	3	34952.5	***	93091.5	***	46389.6	***						
Séquences*doses	21	1.41	NS	2.93	**	3.81	***						
années	2	3.74	*	40.44	***	54.86	***						
Séquences*années	14	5.44	***	13.43	***	18.39	***						
doses*années	6	2.61	*	9.23	***	13.55	***						
Séquences*doses*années	42	3.26	***	3.77	***	5.54	***						
<b>Contrastes à priori</b>		<b>%</b>	<b>%</b>	<b>F</b>		<b>%</b>	<b>%</b>	<b>F</b>					
MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL		98	vs 91	23.96	***	99	vs 90	25.81	***				
MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL		98	vs 94	8.46	**	99	vs 92	20.85	***				
MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL		98	vs 95	5.33	*	99	vs 97	0.89					
SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR		94	vs 96	1.30		90	vs 99	32.00	***				
MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR		94	vs 96	3.45		96	vs 99	2.27					
MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR		98	vs 96	1.75		99	vs 99	0.05					
MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR		98	vs 96	0.89		99	vs 99	0.00					
MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL		94	vs 94	0.19		92	vs 90	0.71					
MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL		95	vs 94	0.24		97	vs 96	0.26					
<b>Effet simple de la dose par séquence</b>		<b>1 X</b>	<b>3/4 X</b>	<b>1/2 X</b>	<b>0 X</b>	<b>1 X</b>	<b>3/4 X</b>	<b>1/2 X</b>	<b>0 X</b>	<b>1 X</b>	<b>3/4 X</b>	<b>1/2 X</b>	<b>0 X</b>
MLL-MLL-MLL		95	95	84	0	95	90	86	0	94	88	85	0
MLL-MRR-MLL		98	97	89	0	98	98	95	0	99	99	97	0
MLL-SRR-MLL		98	97	87	0	99	98	92	0	99	99	92	0
MRR-MLL-MLL		97	97	87	0	97	92	87	0	96	90	85	0
MRR-MRR-MRR		99	99	95	0	99	99	98	0	99	99	99	0
MRR-SRR-MRR		100	99	91	0	100	99	98	0	100	99	99	0
SRR-MLL-MLL		98	95	90	0	94	92	84	0	94	83	78	0
SRR-MRR-MRR		98	97	92	0	99	99	99	0	100	99	99	0

## Annexe 2.13 Analyses statistiques pour la répression de *Ambrosia artemisiifolia*

### Répression de *Ambrosia artemisiifolia* L. en %

		2 SAT			5 SAT			8 SAT					
<b>Test sur les effets fixes</b>		<b>F</b>			<b>F</b>			<b>F</b>					
Séquences	7	0.77			1.39			1.67					
doses	3	49642.8	***		81224.2	***		36643.0	***				
Séquences*doses	21	1.32			0.60			1.69					
années	2	12.86	***		11.77	***		17.69	***				
Séquences*années	14	4.12			3.68			2.30					
doses*années	6	7.75			4.82			4.74					
Séquences*doses*années	42	2.13			1.40			2.01					
<b>Contrastes à priori</b>		<b>%</b>	<b>%</b>	<b>F</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>F</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>F</b>			
MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL		97	vs 96	0.69	97	vs 93	3.63	97	vs 91	5.76			
MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL		97	vs 96	1.33	97	vs 94	2.18	97	vs 93	3.22			
MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL		97	vs 97	0.01	97	vs 96	0.04	97	vs 97	0.07			
SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR		97	vs 96	0.32	94	vs 97	2.76	92	vs 96	2.50			
MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR		98	vs 98	0.04	96	vs 96	0.03	94	vs 96	0.44			
MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR		97	vs 96	0.68	97	vs 97	0.17	97	vs 96	0.53			
MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR		97	vs 98	0.34	97	vs 96	0.00	97	vs 96	0.51			
MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL		96	vs 97	0.80	94	vs 94	0.05	93	vs 92	0.26			
MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL		97	vs 98	0.26	96	vs 96	0.00	97	vs 94	1.24			
<b>Effet simple de la dose par séquence</b>		<b>1 X</b>	<b>3/4 X</b>	<b>1/2 X</b>	<b>0 X</b>	<b>1 X</b>	<b>3/4 X</b>	<b>1/2 X</b>	<b>0 X</b>	<b>1 X</b>	<b>3/4 X</b>	<b>1/2 X</b>	<b>0 X</b>
MLL-MLL-MLL		98	98	93	0	94	94	91	0	88	96	91	0
MLL-MRR-MLL		98	99	94	0	98	98	92	0	97	98	95	0
MLL-SRR-MLL		99	99	94	0	98	97	93	0	97	97	88	0
MRR-MLL-MLL		99	99	89	0	99	91	92	0	99	89	92	0
MRR-MRR-MRR		99	96	96	0	98	96	96	0	99	98	96	0
MRR-SRR-MRR		99	99	95	0	99	97	94	0	99	97	92	0
SRR-MLL-MLL		99	96	95	0	97	94	91	0	88	94	93	0
SRR-MRR-MRR		99	97	92	0	99	98	95	0	99	98	90	0

## Annexe 2.14 Analyses statistiques pour la répression des graminées annuelles

### Répression des graminées annuelles en %

		2 SAT				5 SAT				8 SAT			
<b>Test sur les effets fixes</b>		d.l		F		F		F		F		F	
Séquences	7	24.18	***	28.13	***	441.04	***						
doses	3	14339.4	***	5682.97	***	26984.8	***						
Séquences*doses	21	10.85	***	6.87	***	52.22	***						
années	2	35.40	***	54.18	***	581.36	***						
Séquences*années	14	8.66	***	20.58	***	175.83	***						
doses*années	6	8.75	***	8.06	***	78.76	***						
Séquences*doses*années	42	2.43	***	2.71	***	21.32	***						

<b>Contrastes à priori</b>		2 SAT				5 SAT				8 SAT			
		%	%	F	%	%	F	%	%	F	%	%	F
MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL	97 vs 66	62.92	***	93 vs 51	64.97	***	93 vs 44	951.83	***				
MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL	97 vs 85	6.09	*	93 vs 75	6.37	*	93 vs 73	71.11	***				
MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL	97 vs 72	43.86	***	93 vs 57	53.84	***	93 vs 48	928.92	***				
SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR	88 vs 99	4.47	*	79 vs 96	4.98	*	72 vs 97	118.39	***				
MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR	70 vs 99	51.04	***	56 vs 95	66.27	***	48 vs 95	1013.58	***				
MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR	97 vs 99	0.09		93 vs 96	0.07		93 vs 97	1.67					
MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR	97 vs 99	0.04		93 vs 95	0.09		93 vs 95	0.57					
MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL	85 vs 88	0.42		75 vs 79	0.32		73 vs 72	1.34					
MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL	72 vs 70	0.10		57 vs 56	0.26		48 vs 48	0.37					

<b>Effet simple de la dose par séquence</b>		2 SAT				5 SAT				8 SAT			
		1 X	3/4 X	1/2 X	0 X	1 X	3/4 X	1/2 X	0 X	1 X	3/4 X	1/2 X	0 X
MLL-MLL-MLL	86	66	45	0	65	49	38	0	52	42	38	0	
MLL-MRR-MLL	86	74	56	0	67	60	44	0	51	50	44	0	
MLL-SRR-MLL	80	70	58	0	65	55	48	0	50	48	45	0	
MRR-MLL-MLL	90	88	77	0	84	76	64	0	81	75	64	0	
MRR-MRR-MRR	99	99	95	0	96	96	88	0	96	94	88	0	
MRR-SRR-MRR	99	99	98	0	97	96	94	0	96	94	95	0	
SRR-MLL-MLL	92	88	83	0	84	80	73	0	77	68	71	0	
SRR-MRR-MRR	99	99	99	0	97	96	93	0	98	96	96	0	



## Annexe 2.16 Analyses statistiques pour la biomasse sèche des graminées annuelles

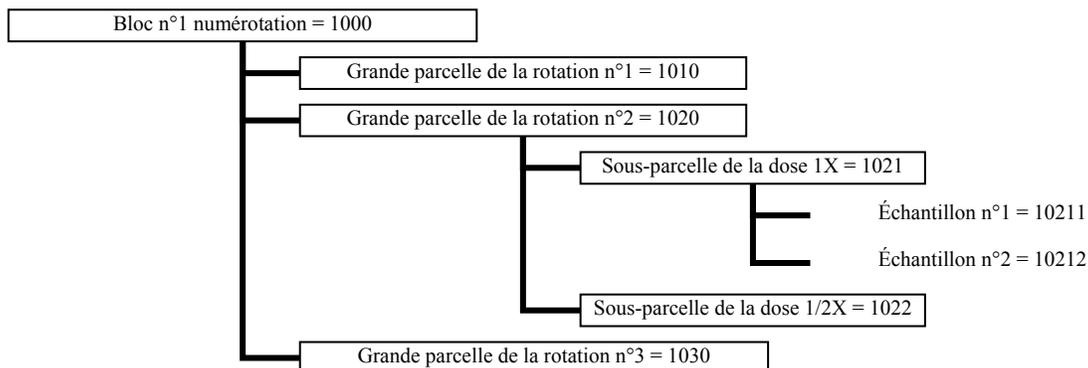
Biomasse sèche moyenne des graminées annuelles en g/m<sup>2</sup>

		8 SAT				16 SAT					
<b>Test sur les effets fixes</b>		<b>d.l</b>		<b>F</b>		<b>F</b>					
Séquences	7	21.98	***	15.75	***						
Doses	3	86.60	***	5.25	**						
Séquences*Doses	21	3.16	**	2.37	**						
Années	2	13.63	***	140.42	***						
Séquences*Années	14	29.74	***	13.26	***						
Doses*Années	6	1.69		15.70	***						
Séquences*Doses*Années	42	6.43	***	3.82	***						
<b>Contrastes à priori</b>											
MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL		45	vs	51	51.40	***	55	vs	70	29.45	***
MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL		45	vs	51	23.22	***	55	vs	47	7.13	*
MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL		45	vs	64	33.03	***	55	vs	60	10.07	**
SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR		28	vs	20	9.88	**	50	vs	24	9.20	**
MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR		21	vs	36	31.29	***	29	vs	21	28.51	***
MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR		45	vs	20	1.74		55	vs	24	2.75	
MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR		45	vs	36	1.93		55	vs	21	11.44	**
MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL		51	vs	28	8.98	**	47	vs	50	1.68	
MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL		64	vs	21	2.38		60	vs	29	1.47	
<b>Effet simple de la dose par séquence</b>											
MLL-MLL-MLL		24	49	67	65	55	67	83	75		
MLL-MRR-MLL		23	29	66	62	47	44	65	63		
MLL-SRR-MLL		22	41	63	130	41	59	81	60		
MRR-MLL-MLL		14	91	34	65	29	37	46	75		
MRR-MRR-MRR		5	6	12	61	8	19	14	76		
MRR-SRR-MRR		4	3	6	130	9	6	9	60		
SRR-MLL-MLL		10	19	22	62	30	58	44	67		
SRR-MRR-MRR		3	9	5	62	8	15	20	52		

## Annexe 2.17 Analyses statistiques du rendement relatif des cultures

		Rendements Relatifs			
		2 SAT			
Test sur les effets fixes		F			
Séquences	7	3.09		*	
Doses	3	521.91		***	
Séquences*Doses	21	1.38			
Années	2	5.19		**	
Séquences*Années	14	0.97			
Doses*Années	6	3.12		**	
Séquences*Doses*Années	42	0.87			
Contrastes à priori		F			
MRR-MRR-MRR vs MLL-MLL-MLL		70	vs	68	4.68 *
MRR-MRR-MRR vs MRR-MLL-MLL		70	vs	68	6.88 *
MRR-MRR-MRR vs MLL-MRR-MLL		70	vs	72	5.31 *
SRR-MLL-MLL vs SRR-MRR-MRR		73	vs	76	0.90
MLL-SRR-MLL vs MRR-SRR-MRR		77	vs	81	6.51 *
MRR-MRR-MRR vs SRR-MRR-MRR		70	vs	76	0.10
MRR-MRR-MRR vs MRR-SRR-MRR		70	vs	81	0.65
MRR-MLL-MLL vs SRR-MLL-MLL		68	vs	73	1.84
MLL-MRR-MLL vs MLL-SRR-MLL		72	vs	77	0.34
Effet simple de la dose par séquence		1 X	3/4 X	1/2 X	0 X
MLL-MLL-MLL		94	92	75	19
MLL-MRR-MLL		90	91	87	14
MLL-SRR-MLL		101	93	87	10
MRR-MLL-MLL		96	84	80	14
MRR-MRR-MRR		100	95	93	23
MRR-SRR-MRR		106	105	101	10
SRR-MLL-MLL		94	93	82	24
SRR-MRR-MRR		97	97	90	24

## Annexe 3.1 Analyse statistique de la banque de semences



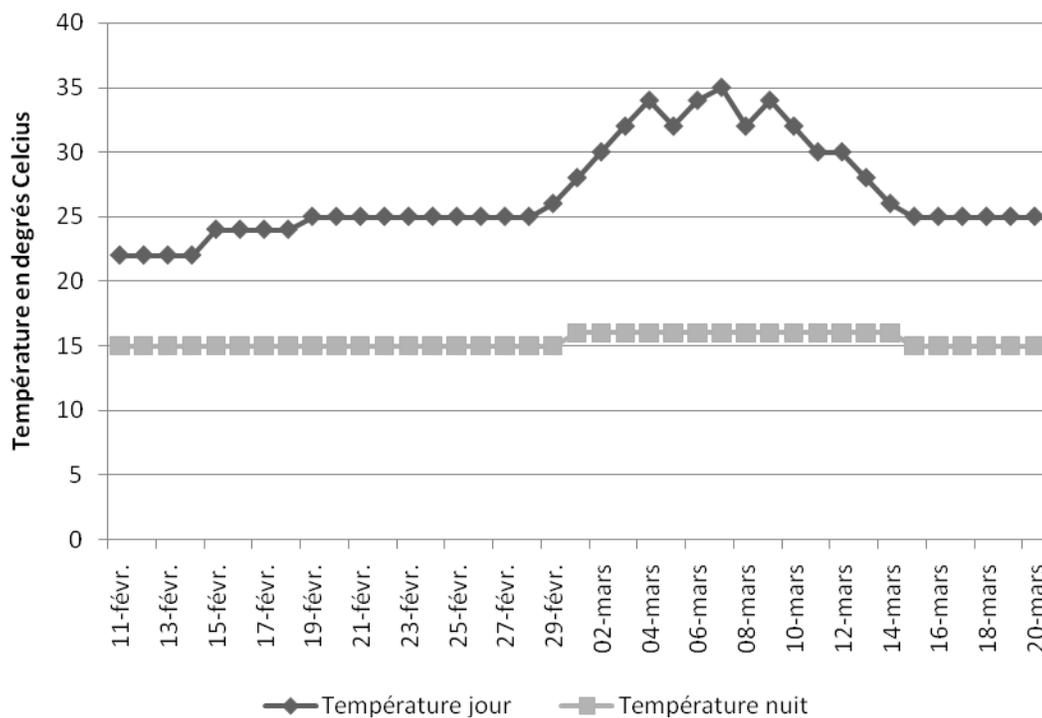
```
options linesize=110 pagesize=52;
run;
```

```
TITLE Impression des donnees;
proc print data= variable;
quit;
```

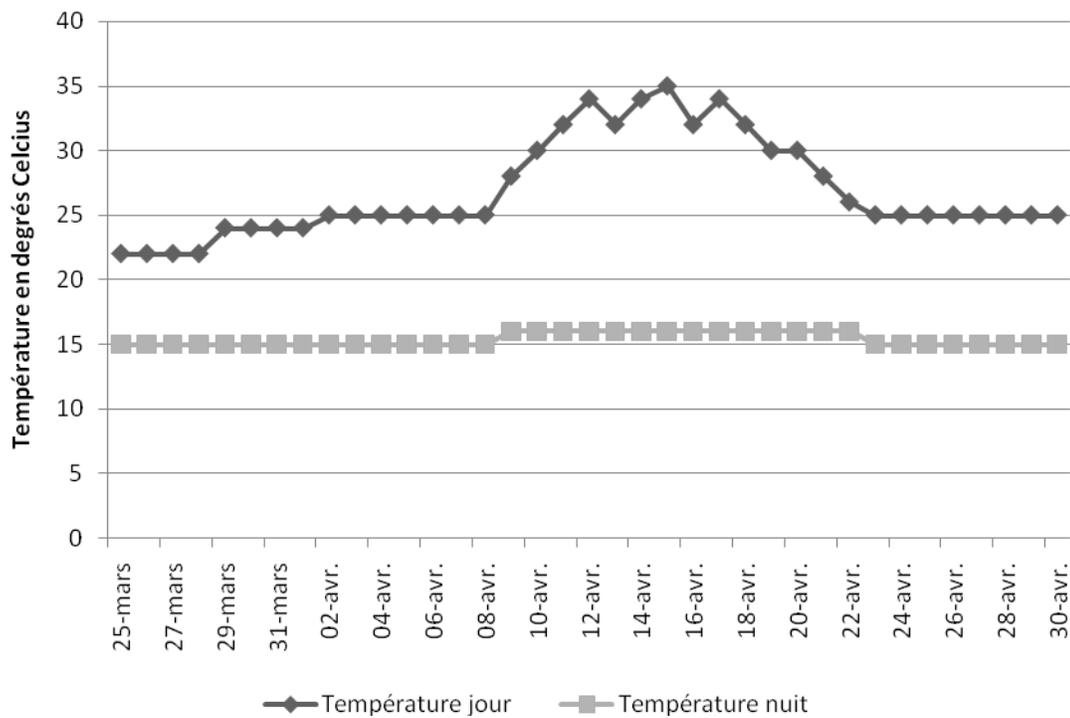
```
proc mixed data=variable
CLASS bloc sequence dose annee echantillon;
MODEL CHEAL=rot|dose|tps /ddfm=KR outp=residus;
RANDOM bloc bloc* sequence bloc* sequence *dose bloc* sequence *dose*echantillon;
REPEATED annee / SUBJECT= bloc*dose*sequence TYPE=CS
lsmeans sequence dose annee sequence *tps dose* annee sequence *dose* annee / PDIFF;
run;
```

```
proc univariate data=residus NORMAL PLOT;
var resid;
histogram / normal;
inset n normaltest pnormal;
probplot / normal;
inset n normaltest pnormal;
quit;
```

## Annexe 3.2 Températures des chambres de croissance



### Température de la première période de germination



### Température de la seconde période de germination

## Annexe 3.3 Codes des noms d'adventices

Codes des noms d'adventice tirés de "Weed Science", Volume 32, supplément 2, 1-137, 1984.

ABUTH	Abutilon ( <i>Abutilon theophrasti</i> )	PLALA	plantain lancéolé ( <i>Plantago lanceolata</i> )
AGRRE	chiendent ( <i>Agropyron repens</i> )	PLAMA	plantain majeur ( <i>Plantago major</i> )
AMAPO	amarante de Powell ( <i>Amaranthus powelli</i> )	POAAN	pâturin annuel ( <i>Poa annua</i> )
AMARE	amarante à racine rouge ( <i>Amaranthus retroflexus</i> )	POAPR	pâturin des prés ( <i>Poa pratensis</i> )
AMBEL	herbe à poux ( <i>Ambrosia artemisiifolia</i> )	POLAH	renouée coriace ( <i>Polygonum achoreum</i> )
ASCSY	asclépiade ( <i>Asclepias syriaca</i> )	POLAV	renouée des oiseaux ( <i>Polygonum aviculare</i> )
AVEFA	folle avoine ( <i>Avena fatua</i> )	POLCO	renouée liseron ( <i>Polygonum convolvulus</i> )
BARVU	barbarée ( <i>Barbarea vulgaris</i> )	POLHY	renouée poivre-d'eau ( <i>Polygonum hydropiper</i> )
CAPBP	bourse-à-pasteur ( <i>Capsella bursa-pastoris</i> )	POLLA	renouée à feuille de Patience ( <i>Polygonum lapathifolium</i> )
CHEAL	chénopode blanc ( <i>Chenopodium album</i> )	POLPY	renouée de Pennsylvanie ( <i>Polygonum pennsylvanicum</i> )
CHEGL	chénopode glauque ( <i>Chenopodium glaucum</i> )	POLPE	renouée persicaire ( <i>Polygonum persicaria</i> )
CHYLE	marguerite ( <i>Chrysanthemum leucanthemum</i> )	POROL	pourpier potager ( <i>Portulaca oleracea</i> )
CICIN	chicorée sauvage ( <i>Cichorium intybus</i> )	PTLAN	potentille ansérine ( <i>Potentilla anserina</i> )
CIRAR	chardon des champs ( <i>Cirsium arvense</i> )	PTLAG	potentille argentée ( <i>Potentilla argentea</i> )
CONAR	liseron des champs ( <i>Convolvulus arvensis</i> )	PTLNO	potentille de Norvège ( <i>Potentilla norvegica</i> )
CONSE	liseron des haies ( <i>Convolvulus sepium</i> )	RAPRA	radis sauvage ( <i>Raphanus raphanistrum</i> )
CYPES	souchet comestible ( <i>Cyperus esculentus</i> )	RORSY	rorippe sylvestre ( <i>Rorippa sylvestris</i> )
DIGIS	digitaire astringente ( <i>Digitaria ischaemum</i> )	RUMAA	rumex petite-oseille ( <i>Rumex acetosella</i> )
ECHCG	pied-de-coq ( <i>Echinochloa crus-galli</i> )	RUMAC	rumex oseille ( <i>Rumex acetosa</i> )
EQUAR	prêle ( <i>Equisetum arvense</i> )	SENVJ	séneçon visqueux ( <i>Senecio viscosus</i> )
ERICA	vergerette du canada ( <i>Erigeron canadensis</i> )	SENVU	séneçon vulgaire ( <i>Senecio vulgaris</i> )
ERYCH	vélar fausse-giroflée ( <i>Erysimum cheiranthoides</i> )	SETFA	sétaire géante ( <i>Setaria faberii</i> )
EPHHE	euphorbe réveille-matin ( <i>Euphorbia helioscopia</i> )	SETLU	sétaire jaune ( <i>Setaria glauca</i> )
GAETE	ortie royale ( <i>Galeopsis tetrahit</i> )	SETVI	sétaire verte ( <i>Setaria viridis</i> )
GASCI	galinsoga cilié ( <i>Galinsoga ciliata</i> )	SILVU	silène cucubale ( <i>Silene cucubalus</i> )
GNAUL	gnaphale des vases ( <i>Gnaphalium uliginosum</i> )	SINAR	moutarde sauvage ( <i>Brassica kaber</i> )
HORJU	orge agréable ( <i>Hordeum jubatum</i> )	SONAR	laiteron des champs ( <i>Sonchus arvensis</i> )
LACSE	laitue serriole ( <i>Lactuca serriola</i> )	SONAS	laiteron épineux ( <i>Sonchus asper</i> )
LINVU	linaire vulgaire ( <i>Linaria vulgaris</i> )	SONOL	laiteron potager ( <i>Sonchus oleraceus</i> )
LOTCO	( <i>Lotus corniculatus</i> )	SPRAR	spargoute ( <i>Spergula arvensis</i> )
MALNE	mauve négligée ( <i>Malva neglecta</i> )	STEME	stellaire moyenne ( <i>Stellaria media</i> )
MATMA	matricaire maritime ( <i>Matricaria maritima</i> )	TAROF	pissenlit ( <i>Taraxacum officinale</i> )
MATMT	matricaire odorante ( <i>Matricaria matricarioides</i> )	THLAR	thlaspie des champs ( <i>Thlaspi arvense</i> )
MEDSA	luzerne cultivée ( <i>Medicago sativa</i> )	TOXRA	herbe à la puce ( <i>Rhus radicans</i> )
MELAL	lychnide blanc ( <i>Lycnis alba</i> )	TRFAR	trèfle des champs ( <i>Trifolium arvense</i> )
OXAST	oxalide dressée ( <i>Oxalis stricta</i> )	TUSFA	tussilage ( <i>Tussilago farfara</i> )
PANCA	panic capillaire ( <i>Panicum capillare</i> )	VICCR	vesce jargeau ( <i>Vicia cracca</i> )
PANDI	panic d'automne ( <i>Panicum dichotomiflorum</i> )	VIOAR	violette des champs ( <i>Viola arvensis</i> )
PANMI	panic millet ( <i>Panicum miliaceum</i> )	XANST	lampourde ( <i>Xanthium strumarium</i> )
PHRCO	phragmites ( <i>Phragmites communis</i> )		

## Annexe 3.4 Analyses statistiques de la banque de graines

		<b>Dicotylédones annuelles</b>	
<b>Test sur les effets fixes</b>		<b>F</b>	
Séquences		3.74	**
doses		97.07	***
Séquences*doses		0.66	
années		789.3	***
Séquences*années		1.75	
doses*années		116.77	***
Séquences*doses*années		0.79	

		<b>Graminées annuelles</b>	
<b>Test sur les effets fixes</b>		<b>F</b>	
Séquences		1.52	
doses		3.40	*
Séquences*doses		0.39	
années		174.58	***
Séquences*années		3.59	
doses*années		7.12	*
Séquences*doses*années		0.82	

		<b>Banque totale</b>	
<b>Test sur les effets fixes</b>		<b>F</b>	
Séquences		4.09	***
doses		69.83	***
Séquences*doses		0.43	
années		776.80	***
Séquences*années		1.23	
doses*années		105.12	***
Séquences*doses*années		0.64	