

HUGUES MARTEL

**ÉVALUATION DE CAPTEURS DE DÉBIT DE RÉCOLTE
ET DE TENEUR EN EAU ADAPTÉS À UNE
FOURRAGÈRE TRAÎNÉE**

Mémoire
présenté
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

Département des sols et de génie agroalimentaire
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE
L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL

NOVEMBRE 1999



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

Our file *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-44923-8

Canada

RÉSUMÉ

Quatre capteurs de débit de récolte et de teneur en eau ont été installés sur une fourragère traînée, soit un capteur de déplacement mesurant l'écartement des rouleaux d'alimentation, un capteur de force mesurant la force de l'impact du fourrage contre la chute, un capteur capacitif basé sur un oscillateur utilisant dans son circuit de résonance un condensateur à plaques quasi-parallèles entre lesquelles circule le fourrage et un capteur d'occupation constitué de 16 alignements horizontaux de diodes-récepteurs infrarouges mesurant l'espace occupé par le fourrage dans la chute. Les capteurs de déplacement et de force ont été testés au champ avec du maïs fourrager. Les capteurs d'occupation et capacitif ont été testés en laboratoire avec du maïs fourrager propulsé par un souffleur à ensilage. Le capteur capacitif a fait l'objet d'une caractérisation afin d'identifier les paramètres auxquels il est sensible. Des relations linéaires ont été obtenues entre les signaux des capteurs de déplacement et de force et le débit récolté (r^2 ajustés de 0,937 et de 0,948 respectivement). Le capteur d'occupation s'est révélé être trop sensible à la présence de fines particules pour détecter le volume occupé par le fourrage. Une relation linéaire entre la chute de fréquence du capteur capacitif et le débit (r^2 ajusté de 0,972) a été obtenue après avoir appliqué une correction tenant compte de la taille des particules. Le capteur capacitif a une erreur RMS (*root mean square*) relative moyenne de 15,4 % lors de la prédiction du débit si la teneur en eau est connue. L'erreur RMS absolue moyenne est évaluée à 9,8 % lors de la prédiction de la teneur en eau si le débit sec est connu, et à 8,8 % si le débit humide est connu. Le modèle propose cependant deux prédictions différentes de la teneur en eau si c'est le débit humide qui est connu. Un autre capteur doit être utilisé pour rejeter l'une de ces prédictions.

Roger Thériault, ing., Ph.D.

Professeur

Directeur de recherche

Philippe Savoie, ing., Ph.D.

Professeur associé

Codirecteur de recherche

Hugues Martel

Étudiant gradué

AVANT-PROPOS

Je remercie d'abord mon directeur de recherche, le Dr Roger Thériault. J'adresse un remerciement spécial à mon codirecteur, le Dr Philippe Savoie pour son dévouement et son assistance au cours de la réalisation de ce projet de recherche.

Je voudrais aussi remercier Martin Roberge, Sébastien Descôteaux et Éric Morel pour les nombreuses heures de travail accomplies lors de l'expérimentation des différents capteurs.

Les employés de la ferme expérimentale d'Agriculture et Agro-Alimentaire Canada à Lennoxville méritent aussi un remerciement particulier pour leur grande coopération lors de l'expérimentation des capteurs au champ.

Pour leur support financier et matériel, j'aimerais finalement remercier Agriculture et Agro-Alimentaire Canada, Dion Machineries, Innotag et l'Université Laval.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
INTRODUCTION	1
Chapitre 1. REVUE DE LITTÉRATURE	4
1.1 Mesure de l'humidité et/ou du débit de récolte de grains	5
1.1.1 Mesure de la conductivité du grain	5
1.1.2 Mesure de la permittivité du grain entre les plaques d'un condensateur	6
1.1.3 Mesure de la permittivité du grain par un faisceau de micro-ondes	7
1.1.4 Mesure de l'intensité sonore d'un jet de grains tombant dans un entonnoir	9
1.1.5 Mesure de la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur le grain	9
1.2 Mesure de l'humidité de morues	10
1.3 Mesure de l'humidité et/ou de la densité du coton	10
1.3.1 Mesure de la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur des graines de coton	10
1.3.2 Mesure de l'impédance d'un condensateur	11
1.3.3 Mesure de la résistivité électrique des graines	11
1.4 Mesure de l'humidité et/ou du débit de récolte de fourrage	12
1.4.1 Mesure de la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur le fourrage	12
1.4.2 Mesure de l'écartement des rouleaux d'alimentation	13
1.4.3 Mesure du rendement par radioactivité	14
1.4.4 Mesure de la force de projection du fourrage	14
1.4.5 Mesure de la capacité d'une plaque	15
1.5 Mesure de débit de produits inorganiques	15
1.5.1 Mesure de la force de Coriolis	15
1.5.2 Mesure du moment d'inertie d'un gyroscope	16

1.5.3	Mesure des charges électrostatiques	16
1.5.4	Mesure dynamique de la capacité d'un condensateur	16
1.5.5	Mesure du moment exercé sur une plaque inclinée	17
1.6	Conclusion	17
Chapitre 2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL		19
2.1	Essais des capteurs de déplacement et de force	20
2.1.1	Matériel utilisé	20
2.1.2	Dispositif expérimental	22
2.1.3	Déroulement des essais	22
2.1.4	Filtrage	23
2.2	Essais dynamiques du capteur optique et du capteur capacitif	25
2.2.1	Matériel utilisé	25
2.2.2	Dispositif expérimental	28
2.2.3	Déroulement des essais	30
2.3	Caractérisation du capteur capacitif	30
2.3.1	Matériel utilisé	31
2.3.2	Dispositif expérimental	31
2.3.3	Déroulement des essais	32
Chapitre 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS		33
3.1	Capteur de force	34
3.1.1	Résultats obtenus	34
3.1.2	Discussion	36
3.1.3	Conclusion	37
3.2	Capteur de déplacement	38
3.2.1	Résultats obtenus	38
3.2.2	Discussion	39
3.2.3	Conclusion	39
3.3	Capteur d'occupation	40
3.3.1	Résultats obtenus	40
3.3.2	Discussion	40
3.3.3	Conclusion	42
3.4	Capteur capacitif	43
3.4.1	Résultats obtenus	43
3.4.2	Discussion	43
3.4.3	Conclusion	45
3.5	Caractérisation du capteur capacitif	46
3.5.1	Traitement des données	46
3.5.2	Discussion	51
3.5.3	Conclusion	54
CONCLUSION		56
Bibliographie		59

Annexe A. Graphiques des résultats des capteurs de déplacement et de force au champ	62
Annexe B. Essais dynamiques au laboratoire	75
Annexe C. Prédiction obtenues par la caractérisation du capteur capacitif	81

LISTE DES FIGURES

2.1	Schéma conceptuel du capteur de déplacement.	20
2.2	Schéma conceptuel du capteur de force.	21
2.3	Position du capteur de force.	21
2.4	Schéma du dispositif expérimental et du regroupement des évaluations de rendement.	23
2.5	Schéma du capteur d'occupation. Ce capteur a été utilisé à deux endroits : avant le condensateur (en jaune) et après (en mauve).	25
2.6	Schéma du capteur capacitif. Les plaques bleues sont mises à la terre et la plaque rouge est reliée à l'oscillateur.	26
2.7	Schéma électronique du capteur d'occupation.	27
2.8	Dimensions du condensateur (en bleu) et position des diodes du capteur optique lorsque placées avant le condensateur (en jaune) et après (en mauve).	28
2.9	Schéma électronique de l'oscillateur.	28
2.10	Bacs utilisés pour contenir le fourrage dans le condensateur.	31
3.1	Signal du capteur de force par rapport au débit estimé de matière humide.	36
3.2	Signal du capteur de déplacement par rapport au débit estimé de matière humide.	38
3.3	Histogrammes du nombre de faisceaux obstrués à chaque balayage et approximations par des courbes normales.	41
3.4	Courbes normales tirées des histogrammes du nombre de faisceaux obstrués.	41
3.5	Amplitudes et valeurs moyennes des courbes normales tirées des histogrammes du nombre de faisceaux obstrués.	42
3.6	Sommes des diminutions de fréquence du capteur capacitif.	44
3.7	Sommes normalisées par rapport au débit des variations de fréquence du capteur capacitif.	45
3.8	Débits mesurés par le capteur capacitif.	45
3.9	Effet de la correction chronologique sur deux sous-parcelles.	47
3.10	Amplitude maximale de la correction chronologique appliquée aux différentes parcelles secondaires.	47

3.11 Comparaison des données brutes recueillies avec les bacs vides selon les bacs.	47
3.12 Régressions linéaires obtenues dans le cas d'une quantité de matériel maximale faible et d'une autre élevée.	48
3.13 Régressions linéaires de l'intensité des variations de fréquence (pente) en fonction de la teneur en eau selon l'espèce et la longueur de coupe.	49
A.1 Spectre typique du capteur de force.	63
A.2 Spectre typique du capteur de déplacement.	64
A.3 Données typiques du capteur de déplacement.	65
A.4 Capteur de force : signal brut.	66
A.5 Capteur de force : essai 1	67
A.6 Capteur de force : essai 2	68
A.7 Capteur de force : essai 3	69
A.8 Capteur de force : essai 4	70
A.9 Capteur de force : essai 5	71
A.10 Capteur de force : essai 6	72
A.11 Capteur de déplacement : signal brut.	73
A.12 Capteur de déplacement : filtre passe-bas.	74
B.1 Premier essai du capteur optique	76
B.2 Deuxième essai du capteur optique	76
B.3 Troisième essai du capteur optique	77
B.4 Quatrième essai du capteur optique	77
B.5 Cinquième essai du capteur optique	78
B.6 Sixième essai du capteur optique	78
B.7 Septième essai du capteur optique	79
B.8 Huitième essai du capteur optique	79
B.9 Neuvième essai du capteur optique	80
C.1 Prédiction de la chute de fréquence d'oscillation (équation 3.5) vs la chute de fréquence expérimentale lorsque la teneur en eau et la masse du matériel sont connues.	82
C.2 Prédiction de la quantité de matériel (équation 3.6) vs la masse expérimentale lorsque la fréquence d'oscillation et la teneur en eau sont connues.	83
C.3 Prédiction de la teneur en eau (équation 3.7) vs la teneur en eau expérimentale lorsque la fréquence d'oscillation et la masse sèche du matériel sont connues.	84
C.4 Prédiction de la teneur en eau (équation 3.8) vs la teneur en eau expérimentale lorsque la fréquence d'oscillation et la masse humide du matériel sont connues.	85

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Débits, disposition et quantités de maïs utilisés lors du premier bloc.	29
2.2	Débits, disposition et quantités de maïs utilisés lors du second bloc.	29
2.3	Débits, disposition et quantités de maïs utilisés lors du troisième bloc.	30
3.1	Évaluations de rendement en kilogramme de matière humide par mètre linéaire sur deux rangs de maïs.	34
3.2	Évaluations de rendement regroupées en kilogramme de matière humide par mètre linéaire sur deux rangs de maïs.	34
3.3	Vitesses (Vit.) et débits (Déb.) récoltés lors des essais.	35
3.4	Évaluations de la teneur en eau (base humide) du matériel récolté lors des essais.	35
3.5	Teneur en eau des échantillons de maïs.	40
3.6	Coefficients $a_{(j)}$ et $b_{(j)}$ obtenus pour chaque couple espèce-longueur de hachage.	50
3.7	Coefficients de corrélation et erreurs de la prédiction de la chute de fréquence — quantité de matériel et teneur en eau connues.	51
3.8	Coefficients de corrélation et erreurs de la prédiction de la quantité de matériel — teneur en eau et chute de fréquence connues.	52
3.9	Coefficients de corrélation et erreurs de la prédiction de la teneur en eau — quantité de matériel sec et chute de fréquence connues.	52
3.10	Coefficients de corrélation et erreurs de la prédiction de la teneur en eau — quantité de matériel humide et chute de fréquence connues.	52

INTRODUCTION

L'agriculture de précision consiste à mesurer à une échelle d'au plus quelques mètres divers paramètres d'un champ de façon à en optimiser l'exploitation. Elle est un moyen d'améliorer la productivité d'une exploitation agricole par un meilleur usage des pesticides et des engrais. Or, son efficacité est limitée par la précision et la pertinence des mesures disponibles. La mesure du rendement permet d'identifier les zones problématiques d'un champ. Les mesures en temps réel du débit et de la teneur en eau du matériel récolté sont nécessaires pour une détermination précise de la matière sèche par unité de surface sur une petite échelle. La connaissance de la teneur en eau durant la récolte des fourrages peut aussi servir à régler la durée du fanage et le dosage d'additifs pour obtenir des conditions optimales de conservation des ensilages.

Divers capteurs mesurant le débit de récolte de différentes cultures ont été développés et sont utilisés commercialement. Si certaines cultures comme les carottes utilisent des procédés de récolte se prêtant bien à une pesée en continu du matériel, ce n'est pas le cas des cultures fourragères hachées car le matériel est convoyé presque exclusivement de façon pneumatique dans la récolteuse. De plus, l'emploi de balances permet de mesurer la masse totale humide mais un autre capteur est nécessaire pour mesurer la teneur en eau. De tels capteurs sont déjà utilisés sur des moissonneuses-batteuses lors de la récolte de grains, mais le fourrage est un matériel généralement plus hétérogène et plus humide que le grain et peut requérir un capteur spécifique à de telles conditions.

L'objectif de ce mémoire de maîtrise est l'évaluation de différents capteurs pour la mesure du débit massique et de la teneur en eau du fourrage en continu durant la récolte. L'utilisation de deux capteurs ayant des dépendances différentes envers ces deux variables permet d'évaluer le débit et la teneur en eau au moyen d'un système d'équations à deux inconnues. Quatre capteurs basés sur divers principes physiques sont évalués. Ces capteurs sont un capteur de force mesurant la force exercée par le fourrage sur la paroi de la chute de la fourragère, un capteur de déplacement mesurant l'écartement entre les rouleaux d'alimentation de la fourragère, un capteur capacitif

basé sur un oscillateur utilisant un condensateur au sein duquel circule le fourrage et finalement, un capteur d'occupation constitué d'une série de diodes infrarouges faisant face à une série de récepteurs mesurant le volume occupé par le fourrage dans la chute.

Chapitre 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Mesure de l'humidité et/ou du débit de récolte de grains

Bien que peu de recherches aient été effectuées sur des méthodes de détermination en temps réel de l'humidité et du débit du fourrage récolté par une fourragère, plusieurs expériences ont été effectuées en vue de déterminer ces mêmes variables lors de la récolte de grains avec une moissonneuse-batteuse.

Trois principes de mesure de l'humidité du grain, du débit de récolte ou encore de ces deux variables combinées ont fait l'objet de plusieurs recherches : la mesure de la conductivité du grain, la mesure de la constante diélectrique ou de la permittivité complexe du grain au moyen d'un condensateur et la mesure de la permittivité complexe du grain avec un faisceau de micro-ondes. Deux autres principes ont été étudiés de façon moins intensive : la mesure de la réflectivité des rayons infrarouges sur le grain ainsi que la mesure de l'intensité sonore produite par un jet de grains tombant dans un entonnoir.

1.1.1 Mesure de la conductivité du grain

La mesure de la conductivité du grain peut se faire soit de façon non-destructrice, où la conductivité est mesurée à travers des grains entiers, soit de façon destructive, où des rouleaux sont utilisés pour broyer les grains avant de mesurer la conductivité de la poudre obtenue.

Méthodes non-destructrices

Dans les méthodes non-destructrices, le taux d'humidité peut être mesuré en plongeant deux longues plaques conductrices dans des grains. Chung et Verma (1991a, b) ont utilisé cette méthode pour estimer l'humidité du riz entreposé en vrac dans une chambre de séchage. La résistance électrique du riz était influencée non seulement par la teneur en eau des grains mais aussi par leur température. Par contre, ni la pression du riz sur les plaques conductrices, ni l'orientation des plaques dans le riz n'avaient

une influence sur la mesure.

Méthodes destructrices

Dans les méthodes destructrices, la conductivité des grains de maïs peut être mesurée en faisant passer les grains entre deux rouleaux broyeurs. La résistance est mesurée au niveau même des rouleaux. Une bonne corrélation a été obtenue avec du maïs grain par Nelson et al. (1990) avec un coefficient de détermination $r^2 = 0,9748$ et également par Watson et al. (1979) ($r = 0,97$). Une erreur typique de 1 % sur le taux d'humidité a été obtenue par Nelson et Lawrence (1989). Il est possible d'obtenir une mesure du taux d'humidité en ne broyant qu'une quarantaine de grains.

1.1.2 Mesure de la permittivité du grain entre les plaques d'un condensateur

La permittivité des grains peut être déterminée en mesurant la capacité d'un condensateur à plaques parallèles ou à tubes concentriques. Deux méthodes de mesure de la capacité sont employées, l'une utilisant un générateur de fonctions à fréquence fixe et l'autre utilisant un oscillateur.

Générateur à fréquence fixe

Une bonne corrélation ($r^2 = 0,9775$) a été obtenue par Nelson et al. (1990) dans le maïs au moyen d'un condensateur à plaques parallèles ne contenant qu'un seul grain en contact avec les plaques. Cette étude a utilisé un analyseur d'impédance 4192A LF de Hewlett Packard qui déterminait la capacité du condensateur, sa constante relative de perte et le déphasage associé à deux fréquences différentes, l'une de 1 MHz et l'autre de 4,5 MHz. Une précision de 1 % sur le taux d'humidité d'un grain de maïs était jugée possible par Kandala et al. (1987). Le même analyseur d'impédance a été utilisé pour mesurer la capacité du condensateur à une fréquence de 1 MHz, en plus de l'écartement des plaques du condensateur, du poids du grain et de l'aire projetée par le grain. Un modèle prédisant le taux d'humidité et ayant une erreur

standard de 0,6 % a été développé par Nelson et Lawrence (1993). Ces chercheurs ont comparé les mesures de capacité obtenues avec le même analyseur d'impédance à deux fréquences différentes (1 et 5 MHz). Une précision de 1 % a été obtenue par Kandala et al. (1988) où le même analyseur d'impédance était utilisé pour mesurer la capacité et la constante relative de perte du condensateur. Nelson (1979) a démontré que la constante diélectrique des grains variait à peu près linéairement en fonction de la température avec un coefficient thermique positif compris entre $0,01/^{\circ}\text{C}$ lorsque la constante diélectrique était mesurée à une fréquence de 2,45 GHz pour un grain ayant un taux d'humidité de 10% et $0,02/^{\circ}\text{C}$ lorsque la constante diélectrique était mesurée à une fréquence de 10 MHz pour un grain ayant un taux d'humidité de 19 %. Un modèle correctif de la constante diélectrique en fonction de la température a été développé par Lawrence et al. (1991) pour le blé d'hiver *triticum aestivum* lorsque la température variait entre 0°C et 50°C et que la constante diélectrique était mesurée à une fréquence de 1 MHz.

Oscillateur

L'autre méthode pour mesurer la capacité des grains utilise un oscillateur dont la fréquence change en présence de matériel diélectrique. Zoerb et al. (1993) ont développé un modèle présentant une bonne corrélation ($0,85 < r^2 < 0,99$) entre le taux d'humidité et la fréquence mesurée pour différentes sortes de grains en utilisant un oscillateur basé sur un minuteur LM555.

1.1.3 Mesure de la permittivité du grain par un faisceau de micro-ondes

Il existe deux méthodes pour mesurer la constante diélectrique d'une substance à partir d'un faisceau de micro-ondes. L'une mesure la fréquence, l'amplitude et le facteur de qualité de la résonance du faisceau dans une cavité contenant le grain humide. L'autre mesure le déphasage et l'absorption du faisceau passant au travers du grain.

Différentes équations prédisant la constante diélectrique d'un mélange grain humide-air aux constantes diélectriques de ces substances et à leur proportion dans le mélange ont été étudiées par Nelson (1992). Ces équations ont été appliquées à des données obtenues avec des grains de blé d'hiver entiers à 11,5 % d'humidité, à des grains de blé d'hiver moulus à 10,9 % d'humidité ainsi qu'à du riz blanc moulu à 12,2 % d'humidité. Les fréquences auxquelles a été mesurée la constante diélectrique de ces substances étaient respectivement de 9,4, 11,7 et 11,0 MHz.

Mesure dans une cavité de résonance

Différents travaux dont les résultats sont repris par Nelson et al. (1992) ont obtenu une erreur standard sur la mesure du taux d'humidité de grains de soya et de maïs entre 0,45 % et 0,81 %. Ces travaux ont mesuré l'humidité d'un seul grain à la fois. Les taux d'humidité étaient situés entre 7 % et 16 % pour le soya et entre 8 % et 18 % pour le maïs. Les fréquences utilisées étaient de 4,8 GHz (mode de résonance TE_{105}) et de 6 GHz (mode de résonance TE_{107}) pour le soya et de 3,2 GHz (mode de résonance TE_{105}) et de 6 GHz (mode de résonance TE_{107}) pour le maïs.

Mesure de l'absorption et du déphasage

Une fonction prédisant la teneur en eau du grain indépendamment de sa densité a été développée par Powell et al. (1988). Cette fonction utilise la permittivité complexe du grain et est valide entre 10 % et 20 % d'humidité pour des mesures prises avec du blé d'hiver, avec une précision de $\pm 1,5$ %. Ces chercheurs ont aussi proposé un circuit micro-onde opérant à une fréquence de 10,53 GHz pour mesurer le déphasage et l'atténuation du faisceau à travers une substance quelconque. Ces mesures peuvent ensuite être utilisées pour déterminer la permittivité complexe de la substance.

Des modèles prédisant la constante diélectrique du maïs ainsi que le taux d'humidité ont été développés par Nelson (1984). Il est possible de prédire soit la racine carrée, soit la racine cubique de la constante diélectrique en fonction de la densité du maïs par une fonction linéaire. Des relations semblables ont été développées en fonc-

tion du taux d'humidité des grains de maïs. Le taux d'humidité variait entre 10 % et 33 % en base humide et la densité entre 0,69 et 1,12 g/cm³. La constante diélectrique des grains était mesurée soit à 20 MHz avec un Q-Meter modèle 160-A de Boonton, soit à 300 Mhz avec un compteur d'admittance modèle 1602B de General Radio, soit à 2450 MHz avec un système à guide d'onde court-circuité de Rohde et Schwarz.

1.1.4 Mesure de l'intensité sonore d'un jet de grains tombant dans un entonnoir

L'intensité sonore d'un jet de grains de blé a été mesurée pour divers niveaux d'humidité par Mexas et Brusewitz (1987). Ces chercheurs ont trouvé que l'intensité sonore variait selon une équation quadratique ($r = 0,99$). La température du grain n'affectait pas l'intensité sonore si elle était supérieure à 25 °C. Par contre, l'intensité sonore était réduite si la proportion des impuretés présentes dans le grain dépassait 5 %. Finalement l'intensité sonore était semblable pour différentes variétés de blé en autant qu'elles aient une densité similaire.

1.1.5 Mesure de la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur le grain

La réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur du maïs a été étudiée par Shenk et Westerhaus (1985). Trois émetteurs d'infrarouges de *Pacific Scientific* ont été testés : le modèle 6100, le modèle 51A et le modèle 102. Le modèle 6100 est un émetteur monochromatique à émission de longueur d'onde variable entre 1116 et 2476 nm. Le modèle 51A possède six filtres émettant dans six segments du spectre électromagnétique : de 1596 à 1677 nm, de 1675 à 1756 nm, de 1988 à 2096 nm, de 2108 à 2216 nm, de 2244 à 2308 nm et de 2298 à 2356 nm. Le modèle 102 possède trois filtres couvrant les segments du spectre électromagnétique allant de 1902 à 2050 nm, de 2000 à 2190 nm et de 2210 à 2320 nm. Ces chercheurs ont obtenu une erreur standard de 0,41, de 0,53 et de 0,56 % en utilisant des modèles polynomiaux à sept termes, quatre termes et six termes avec les appareils 6100, 51A

et 102 respectivement. Le pourcentage moyen de matière sèche du grain utilisé était de 95,56 % avec un écart type de 1,73 %.

1.2 Mesure de l'humidité de morues

Provencher (1988) a étudié l'absorption d'un faisceau de micro-ondes et la chute de fréquence d'un oscillateur Hartley occasionées par une section de morue. Cette étude visait à établir une fonction calculant le taux d'humidité d'une morue indépendamment de son épaisseur. Le circuit résonnant de l'oscillateur utilisait un condensateur constitué de deux plaques parallèles séparées de 7,62 cm et mesurant 9 cm par 13 cm. Le faisceau de micro-ondes avait une fréquence de 10 GHz. Le modèle présenté calculait le taux d'humidité d'une morue avec une précision de ± 1 % indépendamment de son épaisseur et de sa forme géométrique.

1.3 Mesure de l'humidité et/ou de la densité du coton

Trois méthodes ont été testées pour mesurer le taux d'humidité du coton dans des égreneuses. La première mesurait la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur les graines, la seconde mesurait l'impédance d'un condensateur contenant les graines et la troisième mesurait la résistance électrique des graines.

La mesure de la chute de pression d'un jet d'air passant à travers des fibres de coton a été testée afin d'en mesurer la densité.

1.3.1 Mesure de la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur des graines de coton

Waldie et al. (1984) ont étudié la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur des graines de coton. Le taux d'humidité des graines variait entre 9 % et 19 % en base sèche. Un capteur infrarouge, fabriqué par *Moisture Systems Corporation*, et un modèle obtenu par régression linéaire ont permis de prédire à 3,3 % près la teneur en

eau des graines.

Une étude similaire a été présentée par Anthony (1991). Le taux d'humidité des graines de coton a varié entre 5,7 % et 12,4 %. Un second capteur infrarouge a été placé dans l'égreneuse afin de mesurer le taux d'humidité à la suite d'un séchage. Dans ce cas, le taux d'humidité a varié entre 2,7 % et 9,8 %. Les capteurs d'infrarouges utilisés étaient des *Quadrabeam II* fabriqués par *Moisture Systems Corporation*. Les coefficients de corrélation obtenus par ces deux capteurs ont varié entre 0,69 et 0,78 lorsqu'un modèle linéaire était utilisé.

1.3.2 Mesure de l'impédance d'un condensateur

L'impédance d'un condensateur contenant des graines de coton a été étudiée par Waldie et al. (1984). Le taux d'humidité des graines a varié entre 9 % et 19 % en base sèche. Un modèle obtenu par régression linéaire a prédit à 1,1 % près la teneur en eau des graines.

Le déphasage d'un signal sinusoïdal à 10 kHz a été étudié dans la fibre de coton par Waldie et al. (1983). Ceux-ci ont développé une fonction reliant le taux d'humidité et la densité de la fibre au déphasage du signal. Cette fonction était précise à 0,4 % entre 6,5 % et 12 % d'humidité pour des densités variant entre 12,7 et 35,8 kg/m³. La densité était déterminée par la chute de pression d'un jet d'air traversant en plusieurs points le coton. Une relation linéaire entre la chute de pression et la densité du coton ayant un coefficient de corrélation supérieur à 0,95 a été développée. La réponse du capteur utilisé était cependant jugée lente pour une application commerciale. Un capteur du même type, ayant une précision similaire et pouvant prendre 19 mesures à la seconde a été présenté par Waldie (1983).

1.3.3 Mesure de la résistivité électrique des graines

La résistance mesurée entre deux électrodes plongées dans les graines de coton a été étudiée par Waldie et al. (1984). Le taux d'humidité des graines a varié entre 9 %

et 19 % en base sèche. Un modèle obtenu par régression linéaire prédisait à 2,5 % près la teneur en eau des graines.

1.4 Mesure de l'humidité et/ou du débit de récolte de fourrage

Cinq méthodes ont été testées pour mesurer le taux d'humidité et le débit de récolte de fourrage. La première est la réflectivité d'un faisceau d'ondes électromagnétiques dans l'infrarouge rapproché, la seconde est la mesure de l'écartement des rouleaux d'alimentation d'une fourragère, la troisième est la mesure de l'absorption par le fourrage de radiations émises par une source radioactive, la quatrième est la mesure de la force exercée par le fourrage projeté par la tête de coupe sur une plaque et la cinquième est la mesure de la capacité d'une plaque placée dans l'auge de la fourragère.

1.4.1 Mesure de la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur le fourrage

Shenk et Westerhaus (1985) ont étudié la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges sur du fourrage. Les émetteurs d'infrarouges étaient les mêmes que ceux décrits à la section 1.1.5. Ces chercheurs ont obtenu une erreur standard de 0,19, de 0,36 et de 0,41 % en utilisant des modèles polynomiaux à cinq termes, six termes et quatre termes avec les appareils 6100, 51A et 102 respectivement. Le pourcentage de matière sèche du fourrage utilisé était de 92,20 % en moyenne avec un écart type de 0,85 %.

Un modèle de la réflectivité d'un faisceau d'infrarouges a été développé par Bull (1990). Le fourrage était considéré comme une série infinie de couches dont les propriétés variaient uniquement perpendiculairement au plan des couches. Une fonction compensant la variabilité de l'épaisseur des couches (correspondant à la grosseur des particules de fourrage) a été développée par Bull (1991a). Ce modèle et cette fonction utilisent un faisceau infrarouge bichromatique dont l'une des longueurs

d'onde est plus absorbée par les liaisons O-H de l'eau que l'autre afin de permettre la mesure de l'absorptivité, et par ce fait de la réflectivité, due à la seule présence de l'eau dans le matériel. Le choix de ces longueurs d'onde a été étudié par Bull (1991b) qui a conclu que les deux fréquences choisies doivent être les plus voisines possible de façon à ce qu'elles soient affectées de la même manière par la variabilité de la grosseur des particules du matériel. De plus, une paire de longueurs d'onde globalement peu sensible à la présence d'humidité est souhaitable si le matériel présente des gradients d'humidité prononcés de façon à obtenir une plus grande profondeur de pénétration des infrarouges. Deux paires de longueurs d'onde ont été identifiées comme pouvant être appropriées : 1450 et 1300 nm, et 970 et 900 nm. Bull (1993) a présenté les résultats de tests avec différentes variétés de ray-grass (*Meitra*, *Talbot*, *Sabel* et *S24*) ayant un taux d'humidité entre 40 % et 85 % en utilisant ce modèle, cette fonction et des longueurs d'onde de 1450 et 940 nm. Une méthode de calibration pour différentes variétés d'herbes à différents niveaux de maturité et ne nécessitant qu'une seule mesure avec l'appareil à un taux d'humidité aux alentours de 60 % en base humide a été développée. Une fois cette calibration effectuée, il était possible d'obtenir une précision de ± 6 %.

Une comparaison entre la mesure du taux d'humidité de différentes plantes fourragères par infrarouges et par séchage à l'étuve a été faite par Windham et Barton (1991). Le taux d'humidité de seize échantillons de treize plantes fourragères a été mesuré dans quinze laboratoires. Le taux de variabilité normalisé dans la reproduction des mesures était inférieur à 0,57 %, tant pour les mesures par infrarouges que pour les mesures par séchage à l'étuve. Le taux d'humidité des différents échantillons a varié entre 6 % et 16 %.

1.4.2 Mesure de l'écartement des rouleaux d'alimentation

Des modèles prédisant l'écartement des rouleaux d'alimentation d'une fourragère en fonction du pourcentage de matière sèche et du débit de fourrage ont été développés pour du maïs et de la luzerne par Mains et al. (1984). Des taux de corrélation r^2 de

0,93 ont été obtenus tant pour le maïs que pour la luzerne. Le maïs a été récolté à des taux d'humidité variant entre 52 et 67 % (base humide), et la luzerne a été récoltée à des taux d'humidité variant entre 63 et 78 % (base humide).

Barnett et Shinnars (1998) ont obtenu entre l'écartement des rouleaux d'alimentation d'une fourragère John Deere modèle 3950 et le débit de matière humide des coefficients de corrélation r^2 variant entre 80 % et 83 % dans la luzerne et entre 86 % et 88 % dans le maïs fourrager.

1.4.3 Mesure du rendement par radioactivité

Un modèle prédisant la quantité de fourrage récolté par une fourragère en fonction de l'absorption de radiations émises par une source d'américium 241 et de la vitesse du matériel circulant dans la chute a été présenté par Auernhammer et al. (1995). La vitesse du fourrage dans la chute a été mesurée par un radar *Dickey John Radar II*. L'activité de la source radioactive était de 35 MBq. La fourragère utilisée était une automotrice *John Deere 6810*. La vitesse du matériel circulant dans la chute a varié entre 14 et 18 m/s. Le coefficient de détermination obtenu pour une récolte d'herbe était de 81 %. De plus, 95 % des résultats obtenus dans le maïs fourrager avaient une erreur relative comprise entre -4.5 % et +8.5 % pour un écart type de 7,07 % et un décalage de +3,06 %. La performance des capteurs pouvait être améliorée en les recalibrant au début de chaque champ. Les résultats obtenus dans ce cas avaient un écart type de 3,71 % et un décalage de -0,11 %. La teneur en eau moyenne du maïs récolté était de 32,5 %.

1.4.4 Mesure de la force de projection du fourrage

Barnett et Shinnars (1998) ont obtenu entre la mesure sur une plaque de la force de projection du fourrage par la tête de coupe d'une fourragère John Deere modèle 3950 et le débit de matière humide des coefficients de corrélation r^2 variant entre 74 % et 87 % dans la luzerne et entre 75 % et 79 % dans le maïs fourrager.

1.4.5 Mesure de la capacité d'une plaque

Barnett et Shinnars (1998) ont mesuré la tension entre une plaque placée dans l'auge d'une fourragère John Deere modèle 3950 et le sol. Cette tension est reliée à la capacité entre le sol et cette plaque. Ils ont obtenu entre cette tension et la teneur en eau du fourrage des coefficients de corrélation r^2 de 90 % dans le maïs fourrager et variant entre 90 % et 91 % dans la luzerne.

1.5 Mesure de débit de produits inorganiques

Plusieurs méthodes de mesure de débit ont été testées pour des écoulements de produits non-organiques tels la poussière de charbon, le minerai de fer, les granules de PVC. Ces produits ont généralement un taux d'humidité constant et uniforme. Deux principes appliqués à ces produits mesurent directement le débit d'un écoulement : la mesure de la force de Coriolis et la mesure du moment d'inertie d'un gyroscope. Trois autres principes de mesure ont aussi été étudiés : la mesure des charges électrostatiques induites dans une conduite, la mesure des variations à haute fréquence de la capacité d'un condensateur contenant l'écoulement (appelée mesure dynamique) et la mesure du moment de force exercé sur une plaque inclinée.

1.5.1 Mesure de la force de Coriolis

Des capteurs commerciaux mesurant la force de Coriolis que produit un écoulement dans un tube en U oscillant sont disponibles pour des débits variant entre 0,25 kg/h et 10⁵ kg/h. Les désavantages de ces systèmes de mesure sont une chute de pression importante du fluide ainsi qu'une grande sensibilité aux vibrations externes. Le principe de fonctionnement de ces capteurs a été présenté par Beck et al. (1987). Il est possible d'obtenir une précision de 0,5 % avec ce type de capteur. Ce type de capteur peut aussi être utilisé pour des écoulements de particules transportées pneumatiquement.

1.5.2 Mesure du moment d'inertie d'un gyroscope

Le principe de fonctionnement des capteurs gyroscopiques a aussi été présenté par Beck et al. (1987). Ces capteurs sont constitués d'une conduite courbée de façon à former un cercle pouvant tourner autour de son entrée et de sa sortie. Un capteur de ce type fabriqué par *Control Engineering Corp* peut mesurer un écoulement de gaz ou de liquide avec une précision de 0,25 %. Un capteur de ce genre entraîne aussi une chute de pression importante du fluide. Ce type de capteur peut aussi être utilisé pour des écoulements de particules transportées pneumatiquement.

1.5.3 Mesure des charges électrostatiques

Beck et al. (1987) ont décrit le principe de fonctionnement des capteurs électrostatiques. Une précision de 1,5 % a été obtenue avec un capteur de ce type mesurant le débit de particules de charbon de diamètre inférieur à 600 μm . Les capteurs de ce type sont sensibles à la vitesse d'écoulement, à la grosseur et à la forme des particules et à leur taux d'humidité.

1.5.4 Mesure dynamique de la capacité d'un condensateur

Cette méthode ne s'intéresse qu'au bruit à haute fréquence (≥ 500 Hz) dans la variation de la capacité d'un condensateur. Ce bruit est associé au passage des particules dans le condensateur. Celui-ci est similaire à ceux décrits aux sections 1.1.2 et 1.2. Le principe de mesure a été décrit en détail par Green et al. (1978). Ces chercheurs ont présenté des résultats de mesures prises avec des écoulements de billes d'acier, de perles de verre, de granules de polythène, de granules de PVC et de farine de blé. La lecture de l'appareil pouvait atteindre un maximum avant que la capacité maximale théorique du condensateur soit atteinte. Ce phénomène s'expliquait par le fait que si la densité des particules dans le condensateur était trop élevée, les déplacements aléatoires de ces particules étaient moins importants, réduisant de ce fait l'intensité du bruit produit. Ce système de mesure est aussi dépendant de la vitesse d'écoule-

ment du matériel dans le condensateur. Un appareil ayant une précision de 5 % est cité par Beck et al. (1987).

1.5.5 Mesure du moment exercé sur une plaque inclinée

Un capteur mesurant le moment exercé par un écoulement sur une plaque inclinée a été présenté par Dean (1955). Ce capteur a été testé avec des écoulements gravitationnels de particules de coke sèches, de sable et de minerai de fer. Il s'est avéré que ce capteur était précis à 2,5 % pour des débits allant de 0,454 kg/s à 1,77 kg/s. Une ligne de chute où le moment exercé était indépendant de la hauteur de la chute, donc de la vitesse des particules heurtant la plaque, a été trouvée. Un système prévenant l'agglomération du minerai de fer sur la plaque a aussi été développé.

1.6 Conclusion

Aucun des capteurs mentionnés et pouvant s'appliquer à la récolte de fourrage ne permet de mesurer uniquement le débit de matière sèche ou uniquement la teneur en eau. L'utilisation de deux capteurs ayant des dépendances différentes envers ces deux paramètres est donc essentielle, chaque paramètre pouvant alors être isolé au moyen d'un système à deux équations.

Plusieurs travaux portant sur la mesure en temps réel du taux d'humidité et du débit de grains ou encore de fibre de coton ont été effectués. Cependant, comme les taux d'humidité du fourrage sont plus élevés (entre 40 % et 70 %) que ceux du grain (entre 10 % et 30 %), les résultats obtenus ne peuvent être utilisés pour prédire la teneur en eau et le débit de récolte du fourrage. La présentation physique du fourrage, qui est beaucoup plus collant que le grain et qui se manipule mécaniquement moins bien, limite aussi l'applicabilité de certains principes de mesure, tels la mesure de l'intensité sonore. Ces travaux suggèrent malgré tout quelques principes de mesure qui pourraient se révéler efficaces lorsqu'utilisés avec du fourrage (détermination de la permittivité, soit au moyen de micro-ondes, soit au moyen d'un condensateur).

L'étude de capteurs utilisés pour déterminer le taux d'humidité de produits non-végétaux mais ayant un taux d'humidité semblable au fourrage (comme les filets de morue) permet d'avoir un aperçu du comportement de ces capteurs dans la plage des taux d'humidité observés pour du fourrage. Certains capteurs utilisés pour mesurer le débit de produits inorganiques tels ceux mesurant la force de Coriolis, le moment d'inertie d'un gyroscope et la force appliquée sur une plaque pourraient être utilisés pour mesurer le débit humide du fourrage dans la mesure où ils ne sont affectés que par la masse du produit à mesurer.

Les quelques travaux ayant pour sujet la mesure en temps réel du taux d'humidité et du débit de récolte du fourrage suggèrent au moins un principe de mesure intéressant, soit la mesure de l'écartement des rouleaux d'alimentation.

Trois capteurs ont donc été identifiés comme susceptibles lorsqu'appliqués au fourrage de produire un signal ayant une bonne corrélation avec le débit de récolte, avec la teneur en eau ou encore avec une combinaison de ces deux variables. Ces capteurs mesurent l'écartement des rouleaux d'alimentation (capteur de déplacement), la fréquence d'un oscillateur utilisant dans son circuit de résonance un condensateur au sein duquel circule le fourrage (capteur capacitif) et la force d'impact du fourrage sur une plaque dans la chute (capteur de force). Un quatrième capteur, constitué d'une série de faisceaux infrarouges mesurant le volume occupé dans la chute par des particules de fourrage (capteur d'occupation) a été ajouté à ces trois derniers pour vérifier si ce volume est relié d'une quelconque manière au débit de récolte. Les mesures de la force de Coriolis et du moment d'un gyroscope ont été rejetées à cause des chutes de pression qu'elles occasionnent. La mesure de la permittivité du fourrage au moyen de micro-ondes a aussi été rejetée à cause des coûts élevés des antennes requises pour émettre et recevoir les micro-ondes. L'objectif de ce mémoire est donc l'évaluation de ces quatre capteurs afin de déterminer leur comportement face à des variations de débit ou de teneur en eau.

Chapitre 2

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

2.1 Essais des capteurs de déplacement et de force

La première expérience avait pour but d'évaluer un capteur de déplacement constitué d'un potentiomètre mesurant le déplacement vertical des rouleaux d'alimentation d'une fourragère et un capteur de force constitué d'une cellule de charge mesurant la force d'impact du jet de fourrage dans la chute. Des schémas de ces deux capteurs sont présentés aux figures 2.1 et 2.2.

2.1.1 Matériel utilisé

La récolteuse qui a servi à l'expérience est une fourragère Dion 1224 munie de rouleaux broyeurs. Elle est fabriquée par Dion Machineries. Elle est entraînée par un tracteur White 2-180. Le potentiomètre utilisé pour mesurer l'écartement des rouleaux d'alimentation est un modèle LT résistant à l'eau et ayant une course de 15 cm. Il est fabriqué par Cymatix, à Burlingame, Californie. La non linéarité annoncée de ce capteur est de 1 % à plein déplacement. La cellule de charge utilisée pour mesurer la force exercée par le fourrage sur la paroi supérieure de la chute est une cellule en S d'une capacité maximale de 22.7 kg, modèle 363-D3-50-20P1. Elle est fabriquée par Transducer IT, à Cerritos, Californie. La non linéarité annoncée de ce capteur est de 0.001 % à pleine charge. Le schéma du capteur de force incorporant une cellule de charge est illustré à la figure 2.3. La cellule de force est placée à l'extrémité inférieure

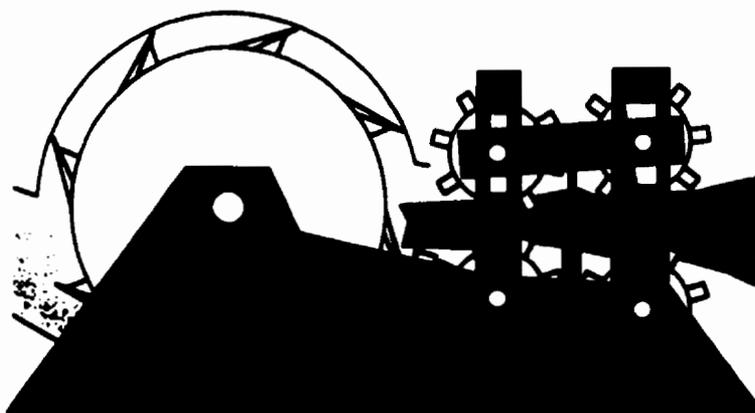


Figure 2.1 : Schéma conceptuel du capteur de déplacement.

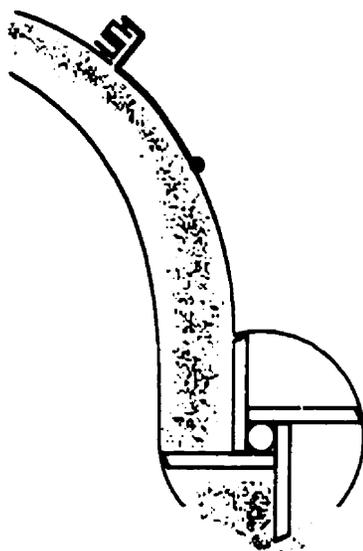


Figure 2.2 : Schéma conceptuel du capteur de force.

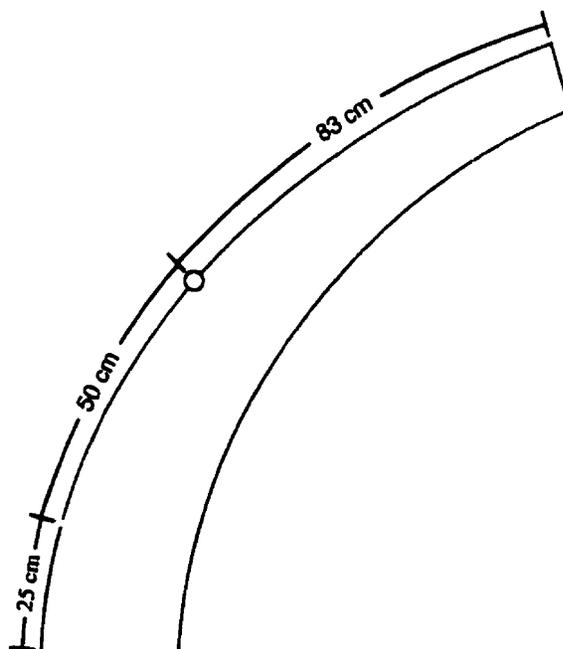


Figure 2.3 : Position du capteur de force.

de la plaque (en vert) dont la largeur est de 23,5 cm.

Les capteurs étaient reliés à une carte d'acquisition PCMCIA DAQ-700 fabriquée par National Instrument, à Austin, Texas. La fréquence d'échantillonnage utilisée est de 37 Hz. La précision de la carte est de $\pm 2,4$ mV. Le logiciel d'acquisition utilisé est LabView version 3.1.

Les deux capteurs ont été évalués dans du maïs fourrager à la ferme expérimentale d'Agriculture Canada à Lennoxville, Québec. Les essais ont eu lieu le 28 septembre 1997. Le maïs était à un stade de maturité hâtif (teneur en eau voisine de 80 % en base humide). La longueur de hachage théorique était de 9,5 mm.

2.1.2 Dispositif expérimental

L'expérience était un dispositif complètement aléatoire. Le facteur de variation était le débit de récolte, obtenu en modifiant la vitesse de récolte. La boîte de transmission du tracteur utilisé permettait de modifier rapidement la vitesse entre deux niveaux. Deux paires de vitesses ont été répétées trois fois. La vitesse d'une paire utilisée en premier a été déterminée au hasard pour chacune des répétitions en s'assurant cependant que chacune des vitesses servirait au moins une fois en début d'essai. Les vitesses utilisées étaient d'environ 5,0 et 6,1 km/h pour la paire la plus lente et d'environ 5,8 et 8,3 km/h pour la paire la plus rapide.

2.1.3 Déroulement des essais

Quatre sections de rangs d'une longueur de 26 m chacune étaient récoltées lors de chaque essai. L'écartement des rangs de maïs était de 76 cm. Le ramasseur d'épis de maïs adapté à la fourragère avait une largeur de deux rangs. Juste avant la récolte, le rendement de chacune des sections était mesuré en coupant à la serpe les plants de maïs sur une longueur d'un mètre dans les deux rangs devant être récoltés. L'emplacement de la mesure de rendement dans chacune des sections était déterminé de façon aléatoire. Une seule mesure de rendement a été effectuée par section de façon

à ne pas retirer trop de matériel des rangs récoltés. Des regroupements de sections trois-à-trois tels qu'illustrés à la figure 2.4 ont servi à estimer un rendement moyen afin d'améliorer la représentativité des tests de rendement.

Après chacun des essais, un échantillon de maïs haché a été prélevé dans la boîte à ensilage pour en déterminer la teneur en eau.

Lors de la prise de données, une période de calibration des capteurs a précédé et suivi chaque essai.

2.1.4 Filtrage

Les données recueillies ont été filtrées dans le domaine de Fourier. Trois types de filtre ont été employés : un filtre passe-bas et deux filtres passe-bande. La fréquence de coupure du filtre passe-bas était de 1 Hz dans le cas des données du capteur de force et de 3 Hz dans le cas de celles du capteur de déplacement. L'une des bandes

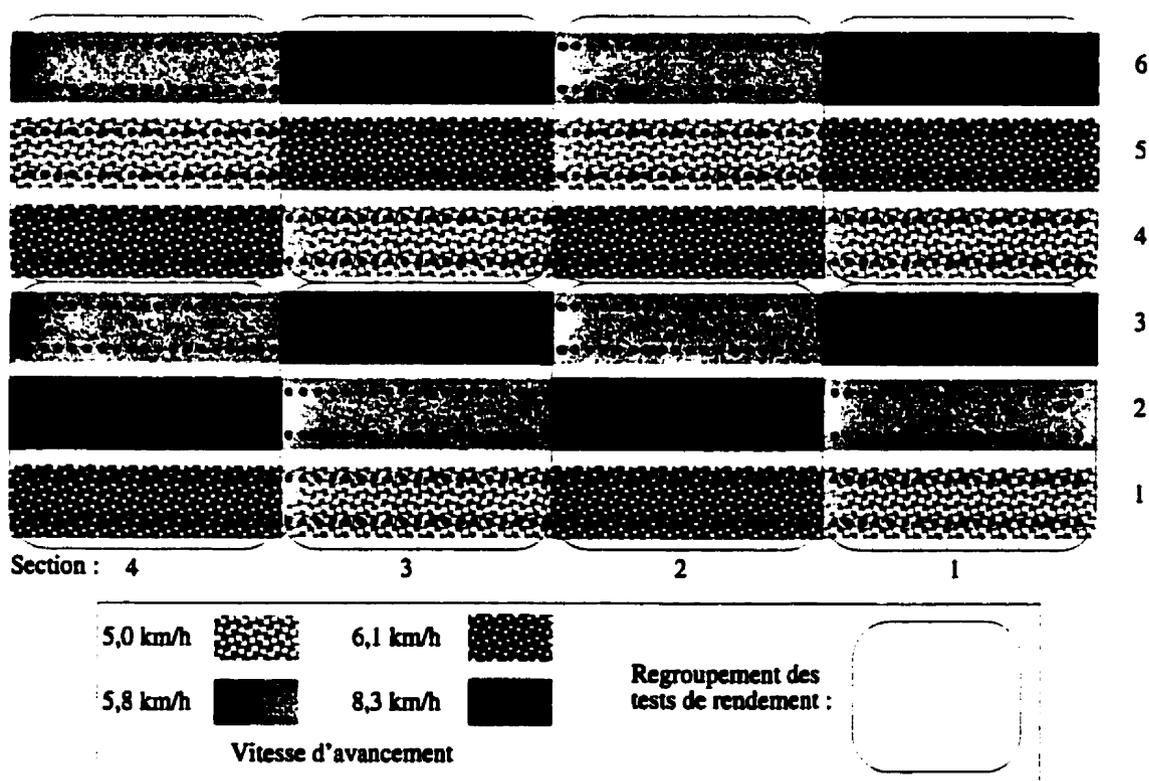


Figure 2.4 : Schéma du dispositif expérimental et du regroupement des évaluations de rendement.

retenues était centrée sur la fréquence de résonance des capteurs sur une largeur de 0,5 Hz, tandis que l'autre était une bande à haute fréquence située hors des zones potentielles de résonance des capteurs. Une plage de fréquence entre 14,0 et 14,5 Hz s'est révélée propice après l'analyse fréquentielle des signaux. La figure A.1 montre le spectre typique des signaux émis par le capteur de force ainsi que les trois filtres retenus. La figure A.2 en fait de même pour le capteur de déplacement. Le centre de la bande couvrant la fréquence de résonance correspond à la fréquence dominante située entre 3 et 10 Hz ; il est susceptible de se déplacer d'un essai à l'autre.

Comme l'application d'un filtre passe-bande produit un signal quasi-sinusoïdal de fréquence voisine à celle du centre de la bande passante et que l'on s'intéresse à l'intensité du signal présent dans la bande passante, nous avons extrait l'amplitude de la quasi-sinusoïdale obtenue, ce qui correspond à ne conserver que l'enveloppe du signal filtré.

L'utilisation des filtres passe-bande a été limitée aux données recueillies avec le capteur de force. Les résonances pouvant se développer dans le système masse-ressort des rouleaux d'alimentation étant probablement dues aux cahots rencontrés par la fourragère et les signaux à haute fréquence du capteur de déplacement étant probablement dus aux vibrations des autres pièces mobiles de la fourragère transmises aux rouleaux ainsi qu'à leur rotation, il serait étonnant qu'un signal significatif soit obtenu avec ces filtres. Les graphiques de la figure A.3 illustrent à titre d'exemple le produit de ces filtres sur les données du capteur de déplacement.

Nous avons retiré des analyses les données recueillies dans les trois secondes suivant un changement de section. Ce délai est justifié par le fait que le signal de changement de section était envoyé manuellement et que l'annonce du changement de section n'était faite au conducteur du tracteur qu'au moment de l'envoi de ce signal. Un délai de trois secondes semble raisonnable pour couvrir le temps de réaction du conducteur ainsi que le temps de décélération du tracteur.

2.2 Essais dynamiques du capteur optique et du capteur capacitif

La deuxième expérience avait pour but d'évaluer un capteur d'occupation composé de seize systèmes DEL-photo transistor dont les faisceaux pouvaient être masqués par le débit des particules, et un capteur capacitif constitué d'un oscillateur utilisant dans son circuit de résonance un condensateur entourant l'écoulement de fourrage. La fréquence de l'oscillateur chutait en présence de fourrage. Des schémas de ces deux capteurs sont présentés aux figures 2.5 et 2.6.

2.2.1 Matériel utilisé

Cette expérience a eu lieu en laboratoire avec un montage composé d'un convoyeur horizontal à courroie (tapis) de 6.4 m de longueur, d'un souffleur à ensilage Dion, modèle 1660, et d'une chute de fourragère Dion 1224 adaptée au-dessus du souffleur. Celui-ci était entraîné par un tracteur Hydro 86 (International Harvester).

Le schéma du capteur d'occupation de la chute est présenté à la figure 2.7. Les DEL utilisées sont des KIE 7304 fabriqués par Knight Lites. Leur longueur d'onde

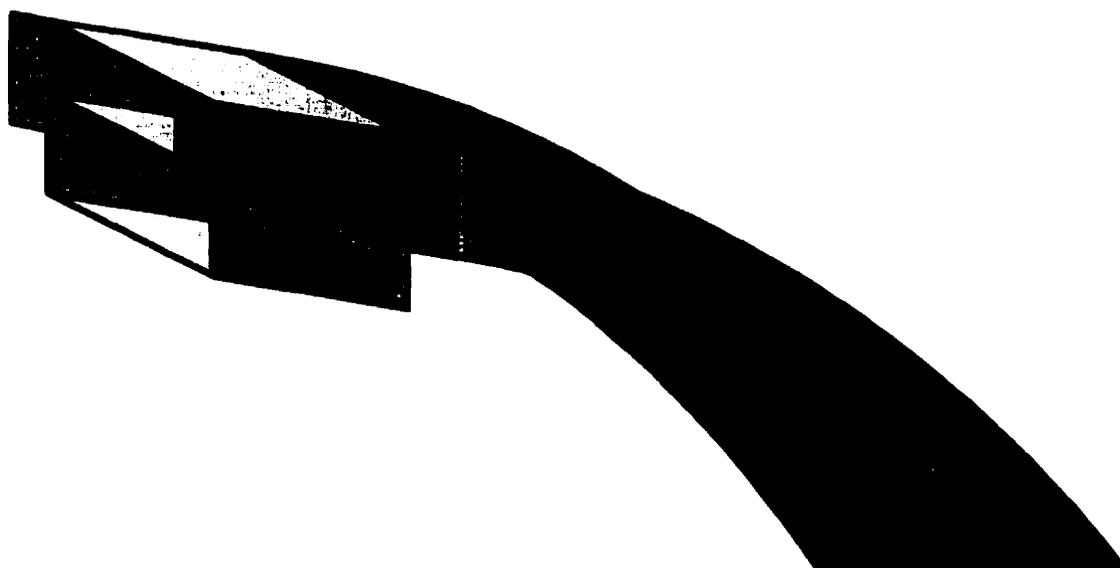


Figure 2.5 : Schéma du capteur d'occupation. Ce capteur a été utilisé à deux endroits : avant le condensateur (en jaune) et après (en mauve).

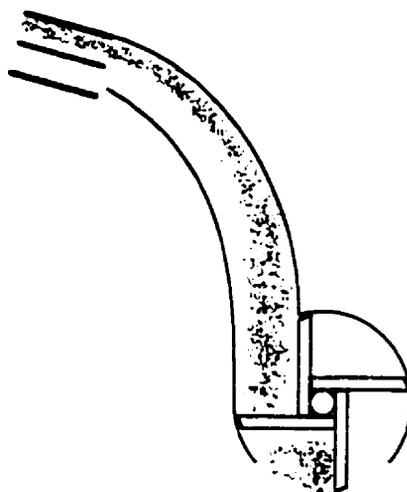


Figure 2.6 : Schéma du capteur capacitif. Les plaques bleues sont mises à la terre et la plaque rouge est reliée à l'oscillateur.

est de 880 nm. Les phototransistors sont des KID 7404 du même fabricant.

Le condensateur est présenté à la figure 2.8. La largeur des plaques du condensateur est de 25 cm. L'oscillateur, basé sur un minuteur TS555CN de SGS Thomson Microelectronics, St. Genis-Pouilly, France, est présenté à la figure 2.9. La forme du condensateur a été choisie après des essais préliminaires de façon à minimiser les risques de bourre. Le circuit de l'oscillateur est celui proposé par Zoerb et al. (1993). La tension d'alimentation de l'oscillateur est de 5 V. La température de l'oscillateur est maintenue à 70 °C au moyen d'un capteur de température de type RTD modèle TFD fait par Omega. Stamford, Connecticut, et d'un système d'acquisition 21X fait par Campbell Scientific, Logan, Utah.

Étant donné la grandeur relative de l'écartement des plaques par rapport à leurs dimensions, il n'est pas possible de calculer la capacité théorique du condensateur en fonction de la permittivité du matériel à cause des effets de bords (le champ électrique dans le condensateur n'est pas normal aux plaques près de leurs extrémités).

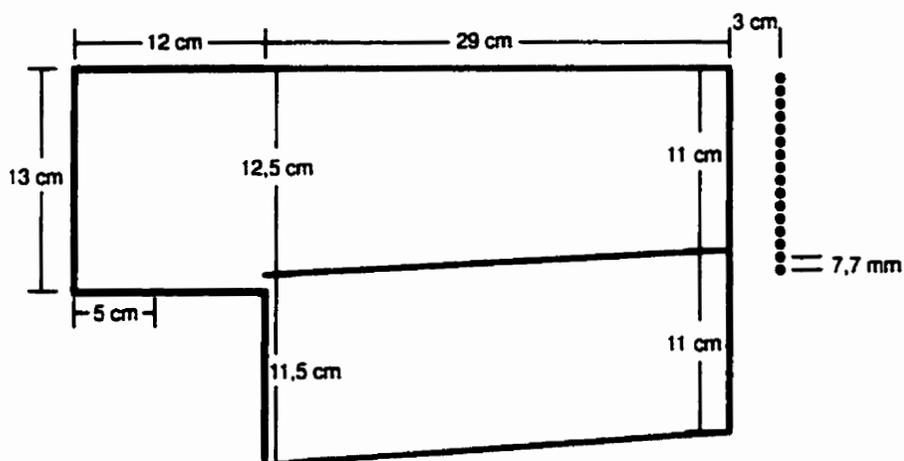


Figure 2.8 : Dimensions du condensateur (en bleu) et position des diodes du capteur optique lorsque placées avant le condensateur (en jaune) et après (en mauve).

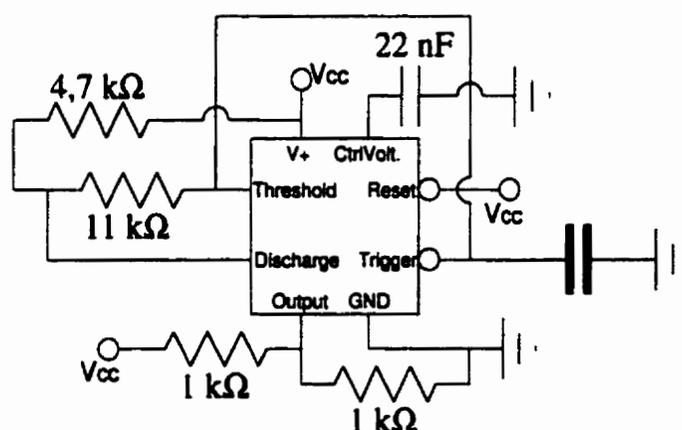


Figure 2.9 : Schéma électronique de l'oscillateur.

intermédiaire (teneur en eau voisine de 60 % en base humide).

2.2.2 Dispositif expérimental

Trois blocs d'essais sur trois jours différents ont été effectués durant la semaine du 9 mars 1998. Chaque bloc était constitué de neuf essais disposés en plan aléatoire. Trois débits différents ont été répétés trois fois chacun. Les débits de matière humide utilisés étaient de 3,6, 7,2, et 10,7 kg/s. Le plan utilisé est présenté aux tableaux 2.1 à 2.3.

Tableau 2.1 : Débits, disposition et quantités de maïs utilisés lors du premier bloc.

Essai	Longueur occupée sur les tapis (m)	Débit (kg/s)	Quantité totale (kg)
1	6,4	3,6	17,6
2	6,4	7,2	35,2
3	6,4	10,7	52,7
4	6,4	3,6	17,6
5	6,4	3,6	17,6
6	6,4	7,2	35,2
7	6,4	10,7	52,7
8	6,4	10,7	52,7
9	6,4	7,2	35,2

Tableau 2.2 : Débits, disposition et quantités de maïs utilisés lors du second bloc.

Essai	Longueur occupée sur les tapis (m)	Débit (kg/s)	Quantité totale (kg)
1	6,4	7,2	35,2
2	6,4	7,2	35,2
3	6,4	3,6	17,6
4	5,6	10,7	46,2
5	5,6	10,7	46,2
6	6,4	3,6	17,6
7	6,4	7,2	35,2
8	6,4	3,6	17,6
9	4,8	10,7	39,6

Tableau 2.3 : Débits, disposition et quantités de maïs utilisés lors du troisième bloc.

Essai	Longueur occupée sur les tapis (m)	Débit (kg/s)	Quantité totale (kg)
1	6,4	10,7	52,7
2	6,4	3,6	17,6
3	6,4	7,2	35,2
4	6,4	3,6	17,6
5	6,4	10,7	52,7
6	6,4	10,7	52,7
7	6,4	7,2	35,2
8	6,4	3,6	17,6
9	6,4	7,2	35,2

2.2.3 Déroulement des essais

Le maïs haché était déposé sur des tapis roulants alimentant le souffleur à ensilage. La vitesse des tapis roulants était de 1,3 m/s. Comme la quantité de maïs était limitée, le même matériel a été réutilisé pour les essais d'un même bloc. Les quantités de maïs placées sur les tapis lors de chacun des essais sont présentées aux tableaux 2.1 à 2.3.

Des échantillons de maïs ont été prélevés après les essais 1, 6 et 9 du premier bloc, les essais 2, 6 et 9 du second bloc et les essais 2, 5 et 9 du troisième bloc pour en mesurer la teneur en eau.

Le capteur d'occupation a été placé après les plaques du condensateur pour les blocs A et B, et avant pour le bloc C.

2.3 Caractérisation du capteur capacitif

Une troisième expérience avait pour but de caractériser le capteur capacitif dans des conditions statiques. Des quantités prédéterminées de fourrage, à différentes longueurs de hachage et à diverses teneurs en eau, ont été placées entre les plaques du

condensateur. La chute de la fréquence de l'oscillateur causée par ce matériel a été mesurée et des relations ont été établies entre cette chute et les caractéristiques du fourrage entre les plaques.

2.3.1 Matériel utilisé

Le capteur capacitif était le même que celui décrit en 2.2.1. Deux bacs en plexiglass (figure 2.10) ont été utilisés pour contenir les échantillons de fourrage dans le condensateur. Les dimensions de chaque bac étaient de 300 mm de long par 230 mm de large et 100 mm de haut (dimensions intérieures). Le plexiglass avait une épaisseur de 4 mm. Le fourrage frais était haché au laboratoire avec un hachoir électrique (Forano, Plessisville, Québec). Un tamis construit selon la norme S424.1 de l'ASAE (1993) a ensuite été utilisé pour séparer le fourrage haché en trois classes selon la longueur, soit entre 0 et 6 mm, entre 9 et 18 mm et entre 18 et 27 mm.

Deux espèces de fourrage, la luzerne et la fléole, ont été utilisées.

2.3.2 Dispositif expérimental

Cette expérience était basée sur un plan factoriel en tiroir à deux niveaux avec deux répétitions (*split-split-plot*). La variable retenue en parcelle principale est le

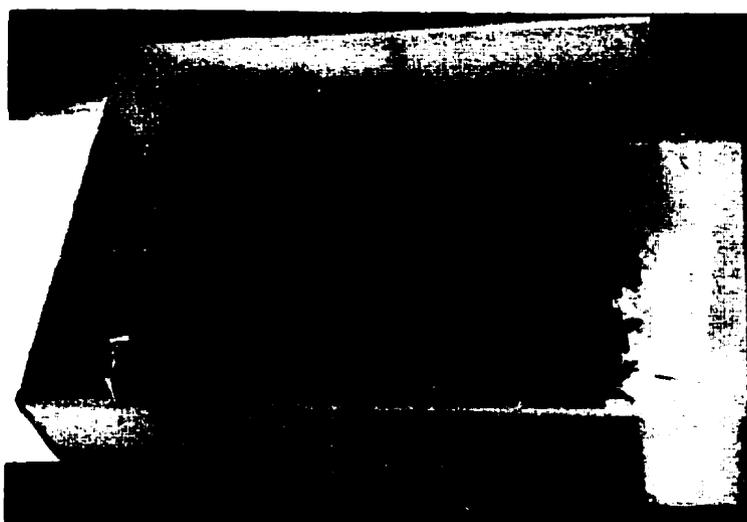


Figure 2.10 : Bacs utilisés pour contenir le fourrage dans le condensateur.

degré de maturité du fourrage, et celle retenue en parcelle secondaire est la teneur en eau. Les variables en sous-parcelle sont l'espèce de la plante (fléole ou luzerne), la taille des particules (0-6 mm, 9-18 mm et 18-27 mm), la teneur en eau du fourrage et la masse des échantillons disposés dans les bacs (0, soit aucun échantillon, et environ 25, 50 et 75 g de matière sèche). Les mesures n'utilisant pas de fourrage n'ont pas été dispersées au hasard parmi les autres mesures, mais intercalées entre chaque groupe de trois mesures. Des mesures n'utilisant ni bac ni fourrage ont aussi été prises au début et à la fin de chaque parcelle secondaire.

2.3.3 Déroulement des essais

Les plantes ont été fauchées à Deschambault, Québec les 1^{er}, 15 et 29 juin 1998. Ces dates correspondaient à trois stades de maturité (hâtif, intermédiaire et tardif). La teneur en eau a varié selon la durée de séchage du fourrage qui était étalé sur des toiles de polyéthylène au laboratoire. La teneur en eau était estimée en pesant les toiles en cours de séchage et en comparant la masse avec la valeur initiale. La teneur en eau initiale était d'environ 80 %. Ces estimations ont servi à déterminer la masse de matière humide que devaient avoir les échantillons pour une teneur en eau visée (80, 70, 60 et 45 %).

Chaque prise de mesure consistait en une série de dix lectures de la fréquence de l'oscillateur. Les deux bacs ont été utilisés en alternance afin de réduire le temps entre chaque prise de mesure lorsque c'était possible. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'étuve puis pesés afin de déterminer précisément leur teneur en eau.

Chapitre 3

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Capteur de force

3.1.1 Résultats obtenus

Évaluations du rendement et de la teneur en eau

Le tableau 3.1 présente les évaluations de rendement obtenues pour chacune des quatre sections des six essais dans un champ de maïs fourrager. Le tableau 3.2 présente les moyennes des évaluations de rendement obtenues pour chacun des groupes. Le tableau 3.3 présente les vitesses mesurées à l'aide des signaux de changement de section ainsi que les débits estimés pour chacune des sections. Le tableau 3.4 présente les teneurs en eau des échantillons prélevés dans la boîte à ensilage après chacun des essais.

Tableau 3.1 : Évaluations de rendement en kilogramme de matière humide par mètre linéaire sur deux rangs de maïs.

Section	Essai					
	1	2	3	4	5	6
1	10.96	12.16	13.52	12.38	12.96	11.24
2	15.68	13.66	13.48	10.10	15.40	14.12
3	10,60	11,40	11,92	13,88	12,12	13,92
4	12.24	10.48	12.98	15.88	13,28	14.88

Tableau 3.2 : Évaluations de rendement regroupées en kilogramme de matière humide par mètre linéaire sur deux rangs de maïs.

Section	Essai	
	1,2 et 3	4, 5 et 6
1	12,2	12,2
2	14,3	13,2
3	11,3	13,3
4	11,9	14,7

Tableau 3.3 : Vitesses (Vit.) et débits (Déb.) récoltés lors des essais.

Section	Essai											
	1		2		3		4		5		6	
	Vit.	Déb.										
	(m/s)	(kg/s)										
1	1,39	17,0	1,66	20,3	2,29	27,9	1,25	15,2	1,74	21,2	2,64	32,2
2	1,64	23,5	2,17	31,0	1,68	24,0	1,69	22,3	1,33	17,6	1,45	19,1
3	1,38	15,6	1,71	19,3	2,34	26,4	1,47	19,6	1,71	22,7	2,43	32,3
4	1,39	16,5	1,74	20,7	1,62	19,3	1,59	23,4	1,28	18,8	1,53	22,5

Tableau 3.4 : Évaluations de la teneur en eau (base humide) du matériel récolté lors des essais.

	Essai					
	1	2	3	4	5	6
TEE (%)	78,3	78,0	78,6	78,3	78,6	80,4

Signal du capteur de force

Les résultats bruts et analysés pour l'ensemble des capteurs sont présentés sous forme graphique aux annexes A à C.

Les graphiques de la figure A.4 présentent les forces mesurées avec le capteur de force lors des six essais effectués. Les données n'ont subi aucun filtrage sur ces graphiques.

Les données obtenues lors des six essais après l'application des trois filtres sont présentées aux figures A.5 à A.10. Lorsque les coefficients de détermination pour l'estimation de la force d'impact filtrée en fonction du débit ont été comparés, le filtre passe-bas s'est montré très supérieur aux filtres passe-bande. La figure 3.1 montre les 24 moyennes des signaux du capteur de force soumis au filtre passe-bas en fonction des débits estimés. La valeur moyenne du signal durant les zones de calibration calculée pour chaque essai a été soustraite du signal. Le coefficient de détermination r^2 ajusté

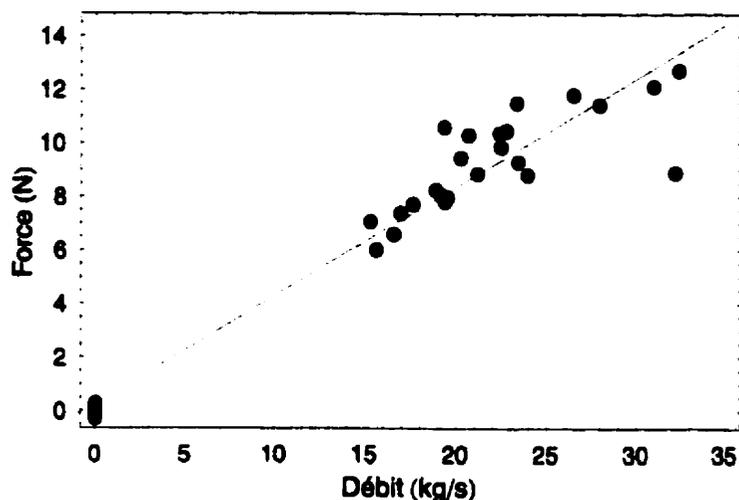


Figure 3.1 : Signal du capteur de force par rapport au débit estimé de matière humide.

de la droite illustrée sur cette figure est de 0,948 et son équation est $f(x) = 0.2475 + 0.4061x$ où x est le débit exprimé en kg/s et $f(x)$ la charge en Newton. L'erreur RMS obtenue avec cette droite sur le débit est de 2,60 kg/s. Le coefficient de détermination obtenu avec le filtre passe-bande centré sur la résonance est de 0,084, et celui obtenu avec le filtre passe-bande situé entre 14,0 et 14,5 Hz est de 0,014.

3.1.2 Discussion

Évaluations de rendement

L'utilisation de pesées regroupées, illustrées à la figure 2.4, a donné des évaluations de rendement suffisamment précises pour que des relations entre les signaux des capteurs et le débit de récolte estimé puissent être établies. Cependant, comme on peut le constater au tableau 3.1, ces pesées révèlent un rendement pouvant varier considérablement lorsque mesuré sur de petites surfaces (le minimum est de 10,10 kg/mètre linéaire et le maximum est de 15,88 kg/mètre linéaire). L'utilisation de seulement trois mesures présentant de telles variations pour déterminer le rendement global d'une section d'un champ peut générer des évaluations de rendement imprécises. L'emploi d'une boîte à ensilage mesurant en temps réel le poids du fourrage récolté pourrait permettre une meilleure connaissance du débit réel de récolte, une réduction de l'erreur expérimentale ainsi qu'une meilleure corrélation du signal des capteurs

avec la quantité de matériel récolté.

Capteur de force

Les données du capteur de force ont été soumises à trois filtres pour établir une relation avec les débits de récolte. Une certaine dépendance était possible entre le débit de récolte et les vibrations produites à la fréquence de résonance dans le cas où les impacts des particules de fourrage étaient la principale source d'agitation de la plaque. Par ailleurs, une dépendance pouvait aussi exister entre le débit de récolte et les vibrations à hautes fréquences dans le cas où ces dernières étaient dues aux collisions individuelles des particules de fourrage contre la plaque. L'utilisation du filtre passe-bas était justifiable par le fait qu'elle correspondait au calcul des valeurs moyennes du signal sur une période égale à la période de coupure du filtre. La fréquence de coupure de ce filtre a été fixée à 1 Hz après analyse fréquentielle de données produites typiquement par ce capteur, en se servant pour cela des données de l'essai 1 et en considérant que l'intensité des signaux de fréquence comprise entre 1 Hz et la fréquence de résonance correspondait à l'intensité des signaux constituant le bruit de fond.

Des trois filtres fréquenciers utilisés, on constate que c'est généralement le filtre passe-bas qui se révèle le plus apte à prédire le débit de récolte. Cette supériorité est évidente avec les données de l'essai 3 et de l'essai 6 présentées aux figures A.5 à A.10.

3.1.3 Conclusion

Le capteur de déplacement permet de prédire le débit de maïs fourrager récolté par une fourragère traînée avec une erreur RMS de 2,60 kg/s (coefficient de régression de 0.948) lorsque la teneur en eau est aux alentours de 79 %. Comme d'importantes variations de rendement ont été observées dans la parcelle de champ utilisée lors de l'expérience, l'utilisation d'une meilleure méthode d'estimation des débits de récolte pourrait réduire l'erreur expérimentale.

3.2 Capteur de déplacement

3.2.1 Résultats obtenus

Évaluations du rendement et de la teneur en eau

Les évaluations de rendement et de la teneur en eau sont les mêmes que celles présentées à la section 3.1.1.

Signal du capteur de déplacement

Les graphiques de la figure A.11 présentent les déplacements mesurés avec le capteur de déplacement lors des six essais sans aucun filtrage.

Les données obtenues lors des six essais après l'application du filtre passe-bas sont présentées à la figure A.12.

La figure 3.2 est analogue à la figure 3.1. mais elle est basée sur les données du capteur de déplacement. Le coefficient de détermination r^2 ajusté de la droite illustrée sur cette figure est de 0.937 et son équation est $f(x) = 0,02623 + 0,07297x$ où x est le débit exprimé en kg/s et $f(x)$ le déplacement en cm. L'erreur RMS obtenue avec cette droite sur le débit est de 2,87 kg/s.

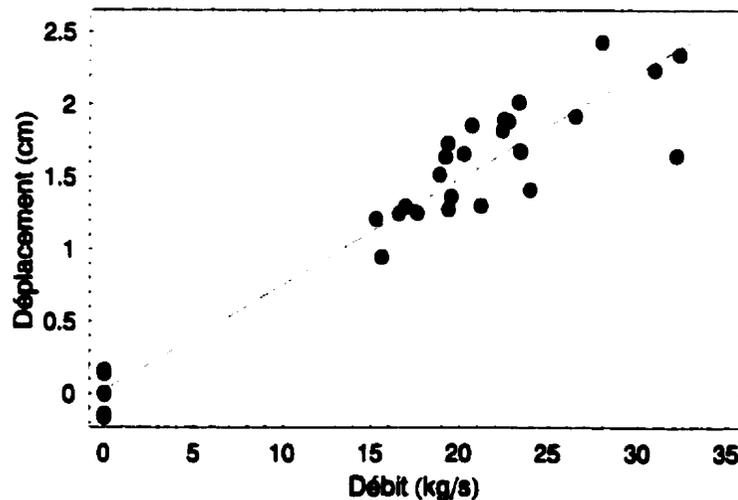


Figure 3.2 : Signal du capteur de déplacement par rapport au débit estimé de matière humide.

3.2.2 Discussion

Capteur de déplacement

Seules les données du capteur de déplacement obtenues après l'utilisation du filtre passe-bas sont présentées, les autres filtres ne pouvant vraisemblablement pas produire des relations significatives. Les graphiques de la figure A.3 confirment ce fait.

On remarque à la figure 3.2 une variation non négligeable des valeurs moyennes mesurées par le capteur de déplacement durant les périodes de calibration. Au moins une partie de ces écarts (qui sont d'environ 5 mm) peut être due au système de fixation du potentiomètre aux rouleaux. Ce système de fixation n'était pas absolument rigide de façon à ce que cette tige puisse pivoter latéralement et que les rouleaux n'exercent pas de pression hors axe sur cette tige. La fixation de la tige avec un joint rotatif pourrait réduire ces écarts, et permettrait d'augmenter le coefficient de régression de la droite.

3.2.3 Conclusion

Le capteur de déplacement permet de prédire le débit de maïs fourrager récolté par une fourragère traînée avec une erreur RMS de 2,87 kg/s (coefficient de régression de 0,937) lorsque la teneur en eau est aux alentours de 79 %. Il n'est cependant pas possible d'identifier clairement si l'un des capteurs, de force ou de déplacement, est supérieur à l'autre, les erreurs RMS obtenues entre leur signal et les débits estimés étant peu éloignées (2,60 kg/s pour le capteur de force). Cependant, le capteur de force risque de présenter une dépendance envers la teneur en eau plus facile à analyser du fait que sa mesure dépend directement de la masse humide du fourrage récolté.

Comme d'importantes variations de rendement ont été observées dans la parcelle de champ utilisée lors de l'expérience, l'utilisation d'une meilleure méthode d'estimation des débits de récolte pourrait réduire l'erreur expérimentale, augmenter les coefficients de régression des deux capteurs et permettre à l'un d'eux de se démarquer.

3.3 Capteur d'occupation

3.3.1 Résultats obtenus

Les figures B.1 à B.9 présentent les résultats obtenus avec les capteurs d'occupation et capacitif lors des essais du second bloc. Les teneurs en eau des échantillons sont présentées au tableau 3.5. Des problèmes au niveau du câblage ont corrompu les données de l'oscillateur lors des essais des blocs 1 et 3.

Tableau 3.5 : Teneur en eau des échantillons de maïs.

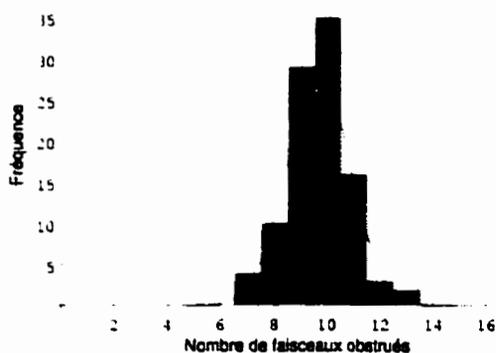
Bloc 1		Bloc 2		Bloc 3	
Essai	TEE (%)	Essai	TEE (%)	Essai	TEE (%)
1	64,7	2	51,5	2	67,8
6	62,4	6	52,0	5	68,0
9	61,2	9	44,1	9	66,8

3.3.2 Discussion

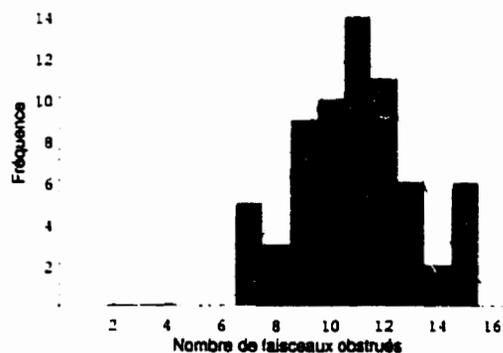
Dans un premier temps, le nombre de faisceaux infrarouges obstrués à chaque balayage pour chacun des essais a été représenté sous forme d'histogramme. Les colonnes des histogrammes correspondant à de faibles quantités de faisceaux obstrués (moins de sept) ont été supprimées car elles étaient dues à des particules isolées soufflées durant les périodes de calibration. Chaque histogramme a ensuite été approximé par une courbe normale. La figure 3.3 illustre deux de ces courbes normales.

Les courbes ont ensuite été tracées sur un même graphique. Nous avons corrigé par une règle de trois l'amplitude des courbes des essais utilisant moins de 6,4 mètres de maïs sur les tapis roulants pour simuler une longueur occupée de 6,4 m pour tous les essais. Ces graphiques sont illustrés à la figure 3.4. Les essais à faible débit sont illustrés en vert, ceux à débit moyen en bleu et ceux à débit élevé en rouge.

Comme la longueur réelle des essais peut varier (elle est influencée par le com-

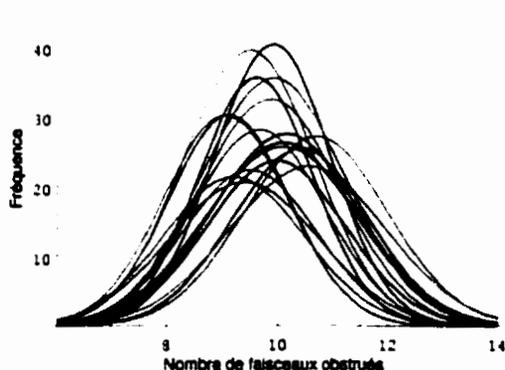


(a) Capteur d'occupation placé après le condensateur

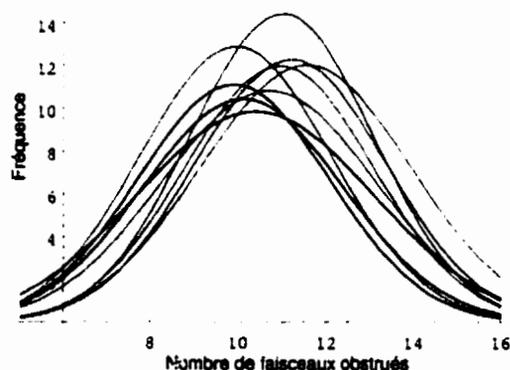


(b) Capteur d'occupation placé avant le condensateur

Figure 3.3 : Histogrammes du nombre de faisceaux obstrués à chaque balayage et approximations par des courbes normales.



(a) Capteur d'occupation placé après le condensateur



(b) Capteur d'occupation placé avant le condensateur

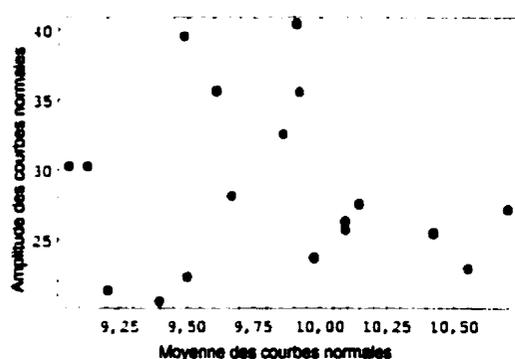
Figure 3.4 : Courbes normales tirées des histogrammes du nombre de faisceaux obstrués. portement du fourrage dans la vis d'alimentation du souffleur), une augmentation de la quantité de matériel sur les tapis roulants ne se traduit pas nécessairement par une augmentation du nombre moyen de faisceaux obstrués à chaque balayage (qui se traduit par un déplacement des courbes normales vers la droite). En effet, un essai se prolongeant va présenter une densité de fourrage dans la chute plus faible mais aussi un nombre de balayages plus important, augmentant ainsi l'amplitude de sa courbe normale. On peut donc s'attendre à ce qu'une augmentation de matériel cause un déplacement de la courbe vers la droite ou un accroissement de son amplitude, ou

un mélange des deux. Donc, en classant sur un graphique les essais en fonction de leur débit et en reportant la moyenne et l'amplitude, on devrait observer une série de courbes plus ou moins parallèles. Or, comme on peut le constater sur les graphiques de la figure 3.5, ce n'est pas le cas, bien que les points des essais à faible débit occupent une zone distincte du graphique lorsque le capteur d'occupation est placé après les plaques du condensateur. Les essais à faible débit sont illustrés en vert, ceux à débit moyen en bleu et ceux à débit élevé en rouge.

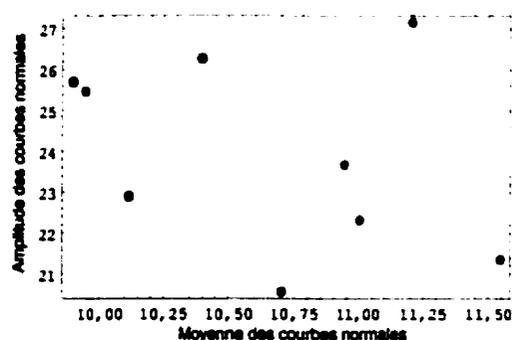
On peut cependant noter sur les graphiques des figures B.1 à B.9 que le capteur d'occupation est très sensible à la présence de fourrage. Cette sensibilité est révélée par les multiples traces enregistrées longtemps après l'arrêt des tapis roulants. Ces traces sont causées par des particules restées dans l'auge de la vis du souffleur, puis finalement entraînées par la vis.

3.3.3 Conclusion

Le capteur d'occupation, du moins avec les diodes infrarouges et les phototransistors utilisés, est trop sensible à la présence de fines particules pour pouvoir détecter efficacement l'écoulement principal de fourrage. Cependant, cette sensibilité peut être utilisée pour détecter avec exactitude si du matériel est en train de circuler dans la



(a) Capteur d'occupation placé après le condensateur



(b) Capteur d'occupation placé avant le condensateur

Figure 3.5 : Amplitudes et valeurs moyennes des courbes normales tirées des histogrammes du nombre de faisceaux obstrués.

chute ou non.

3.4 Capteur capacitif

3.4.1 Résultats obtenus

Les figures B.1 à B.9 présentent les résultats obtenus avec les capteurs d'occupation et capacitif lors des essais du second bloc. Les teneurs en eau des échantillons sont présentées au tableau 3.5. Des problèmes au niveau du câblage ont corrompu les données du capteur capacitif lors des essais des blocs 1 et 3.

3.4.2 Discussion

La fréquence du capteur capacitif chutait en présence d'un débit de particules et était maximale durant les périodes de calibration à vide. Comme le débit n'était pas constant durant chacun des essais, nous avons sommé pour chacun d'eux les écarts entre les fréquences mesurées lorsque le matériel circulait dans la chute et la fréquence moyenne mesurée durant les périodes de calibration. En supposant que cet écart varie linéairement avec la quantité de matériel dans la chute, ces sommes devraient être proportionnelles à la quantité de fourrage utilisée lors d'un essai.

À cause de sa sensibilité au flux de particules, le capteur d'occupation a servi à déterminer le début et la fin de chaque essai. Un essai était considéré en cours lorsqu'au moins six faisceaux étaient obstrués.

Les sommes des différences de fréquence des essais utilisant moins de 6,4 mètres sur les tapis roulants ont été corrigées par des règles de trois. Une règle de trois a aussi été utilisée pour compenser le rejet d'une partie des données de l'essai 8 ; un mauvais contact dû aux vibrations a empêché la mesure des fréquences durant une portion de l'essai (voir la figure B.8). Les sommes des écarts de fréquence sont illustrées à la figure 3.6. Les points en vert représentent les essais de faible débit, ceux en bleu, les essais de débit moyen et ceux en rouge, ceux de débit élevé.

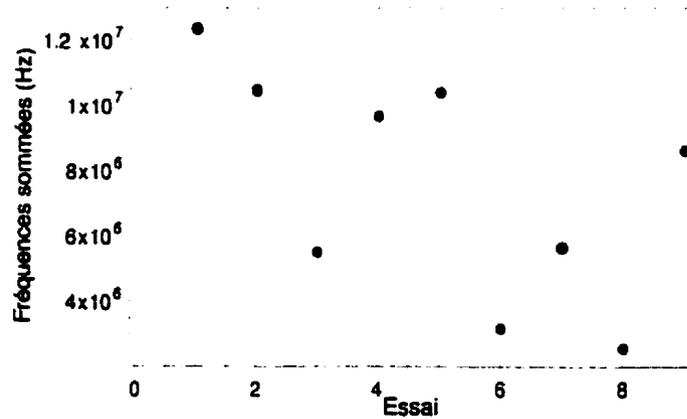


Figure 3.6 : Sommes des diminutions de fréquence du capteur capacitif.

Idéalement, on aurait observé trois lignes horizontales regroupant les trois points obtenus à un même débit. Or, on remarque une diminution des sommes en fonction de l'ordre chronologique des essais. En posant :

$$s = g_{(d)}h_{(p)} \quad (3.1)$$

où g et h sont des fonctions quelconques, s est la somme des variations de fréquence (Hz), d le débit (kg/s) et p est une variable dépendant de la grosseur des particules, et :

$$g_{(d)} = d \quad (3.2)$$

on peut éliminer cette diminution en normalisant les sommes par rapport au débit. Les effets d'une telle normalisation sont illustrés à la figure 3.7. La droite qui y est présentée est obtenue en minimisant la somme des erreurs au carré au moyen de trois paramètres : l'ordonnée à l'origine, la pente et l'écart entre le troisième et le quatrième essai. Cet écart est justifié par le fait que le souffleur a bourré au quatrième essai (essai qui a été repris par la suite), réduisant fortement la taille des particules. La fonction $h_{(p)}$ peut donc être approximée par l'équation de cette droite brisée.

En divisant les sommes non normalisées par la droite brisée de la figure 3.7, on obtient une mesure du débit total d'un essai. Les débits ainsi calculés pour des essais durant $\frac{6.4}{1.3} = 4,9$ secondes sont présentés à la figure 3.8.

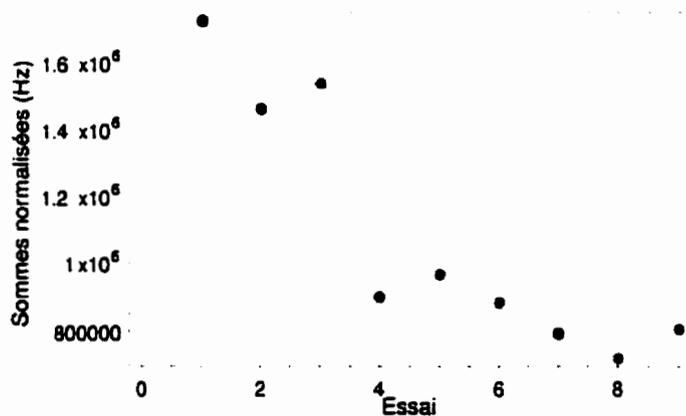


Figure 3.7 : Sommes normalisées par rapport au débit des variations de fréquence du capteur capacitif.

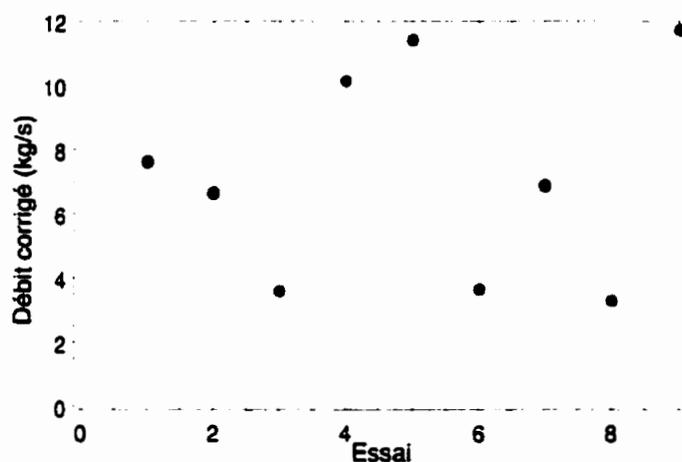


Figure 3.8 : Débits mesurés par le capteur capacitif.

3.4.3 Conclusion

Le capteur capacitif présente une forte dépendance envers le débit de fourrage circulant à l'intérieur de celui-ci de même qu'envers la taille des particules de fourrage. Une caractérisation du comportement de ce capteur lorsque la taille des particules (et possiblement d'autres paramètres) est nécessaire pour évaluer la précision pouvant être obtenue avec ce capteur.

3.5 Caractérisation du capteur capacitif

3.5.1 Traitement des données

Corrections

Deux types de corrections ont été envisagés. Le premier est dû à une particularité de la procédure et de l'environnement physique du capteur capacitif. Le frottement des bacs lors de leur insertion poussait légèrement le condensateur vers le boîtier métallique de l'oscillateur, augmentant ainsi légèrement la capacité parasite entre les plaques du condensateur et le boîtier. Cet effet est visible en comparant les mesures prises sans bac ou avec des bacs vides dans une même parcelle secondaire telles que celles présentées en gris à la figure 3.9b. La première correction distribue la chute de fréquence observée entre le début et la fin d'une parcelle secondaire à chaque insertion de bac. Les prises de mesure sont donc triées dans le temps, corrigées en fonction de leur ordre chronologique et soustraites des mesures prises sans bac dans leur parcelle secondaire. Deux exemples de cette correction appliquée à des mesures prises avec des bacs vides, l'un présentant des chutes de fréquence importantes et l'autre présentant des mesures plus stables, sont présentés à la figure 3.9, où les mesures brutes moyennées sont présentées en gris et les données corrigées le sont en noir. L'amplitude maximale de cette correction est présentée à la figure 3.10 pour les différentes parcelles secondaires. Les données utilisées ici sont les diminutions de fréquence corrigée provoquées par la présence de matériel dans le capteur capacitif.

Le deuxième type de correction envisagé vise à réduire les erreurs induites par l'utilisation de deux bacs différents. L'importance de ces erreurs est illustrée à la figure 3.11. Comme les sources de variation non reliées au choix du bac sont plus importantes que celles dues au bac, aucune correction n'a été appliquée quant au choix du bac.

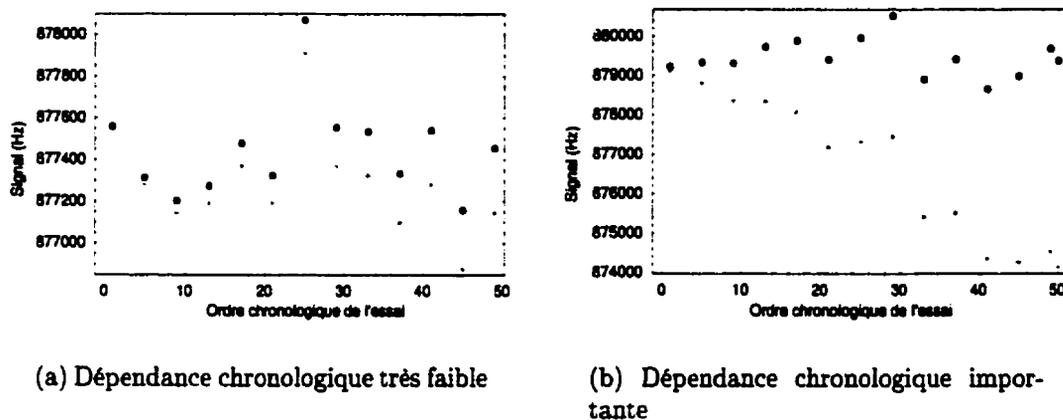


Figure 3.9 : Effet de la correction chronologique sur deux sous-parcelles.

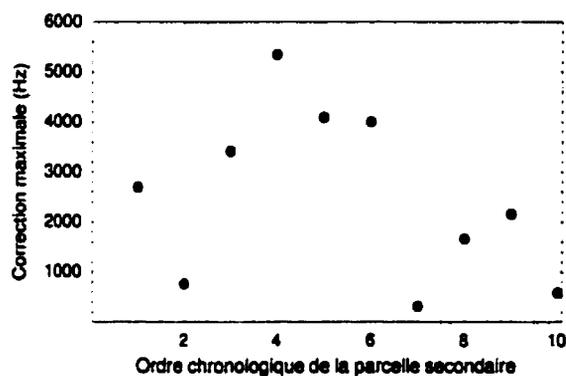


Figure 3.10 : Amplitude maximale de la correction chronologique appliquée aux différentes parcelles secondaires. L'ordre chronologique est le suivant : les parcelles hâtives, les parcelles de maturité intermédiaire puis les parcelles tardives. Au sein d'un même stade de maturité, l'ordre va des parcelles les plus humides aux plus sèches.

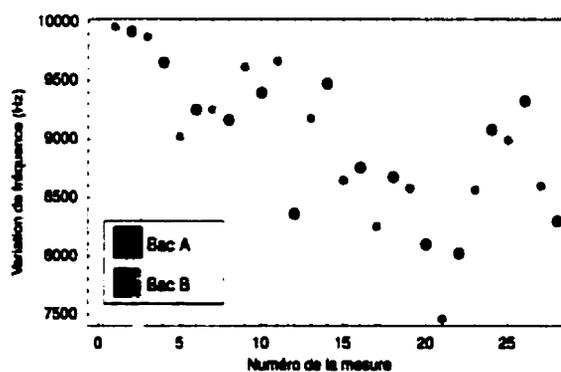


Figure 3.11 : Comparaison des données brutes recueillies avec les bacs vides selon les bacs.

Régressions

Des relations linéaires ont été observées entre la diminution de la fréquence du capteur capacitif et la quantité de matériel sec. Ces relations peuvent être exprimées par :

$$\Delta f \approx \Delta f_b + p_i d_s \quad (3.3)$$

où Δf est la diminution de fréquence observée (Hz), Δf_b est la diminution moyenne de fréquence due à l'insertion d'un bac vide (Hz), d_s est la quantité de matériel sec (kg) et p_i est la pente de la relation (Hz/kg). L'indice i est représentatif de la teneur en eau, de l'espèce et de la longueur de coupe d'un échantillon donné.

L'utilisation de relations linéaires s'avère adéquate dans la plupart des cas pour décrire le comportement du capteur, bien qu'une relation quadratique serait plus précise dans les cas où la quantité de matériel dans le capteur capacitif est importante. Les graphiques de la figure 3.12 illustrent une régression linéaire où la quantité maximale de matériel est faible (fléole hâtive, particules moyennes, environ 83 % TEE b. h.) et une autre où elle est élevée (fléole tardive, particules longues, environ 68 % TEE b. h.).

Des relations linéaires ont ensuite été établies par régression entre la pente des relations décrites par l'équation 3.3 (soit le coefficients p_i de cette relation) et la

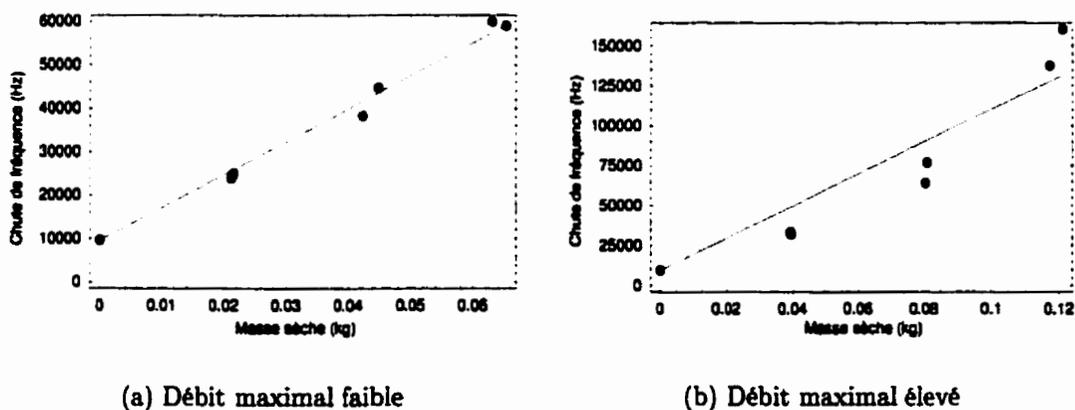


Figure 3.12 : Régressions linéaires obtenues dans le cas d'une quantité de matériel maximale faible et d'une autre élevée.

teneur en eau moyenne des mesures ayant servi à les établir. Ces nouvelles relations peuvent être exprimées par :

$$p_i \approx p_{j(h)} = a_j h + b_j \quad (3.4)$$

où l'indice j est représentatif de l'espèce et de la longueur de coupe d'un échantillon donné, h est la teneur en eau du matériel et a_j et b_j sont des coefficients d'ajustement (Hz/kg). Ces relations sont illustrées à la figure 3.13. Les points en vert représentent l'emploi de matériel hâtif, ceux en bleu l'emploi de matériel de maturité intermédiaire et ceux en rouge, l'emploi de matériel tardif. La longueur de coupe courte correspond à des particules de longueur variant entre 0 et 6 mm, la moyenne à des particules de longueur variant entre 9 et 18 mm et la longue à des particules de longueur variant entre 18 et 27 mm. Le tableau 3.6 montre les coefficients $a_{(j)}$ et $b_{(j)}$ obtenus pour les différentes combinaisons espèce-longueur de coupe.

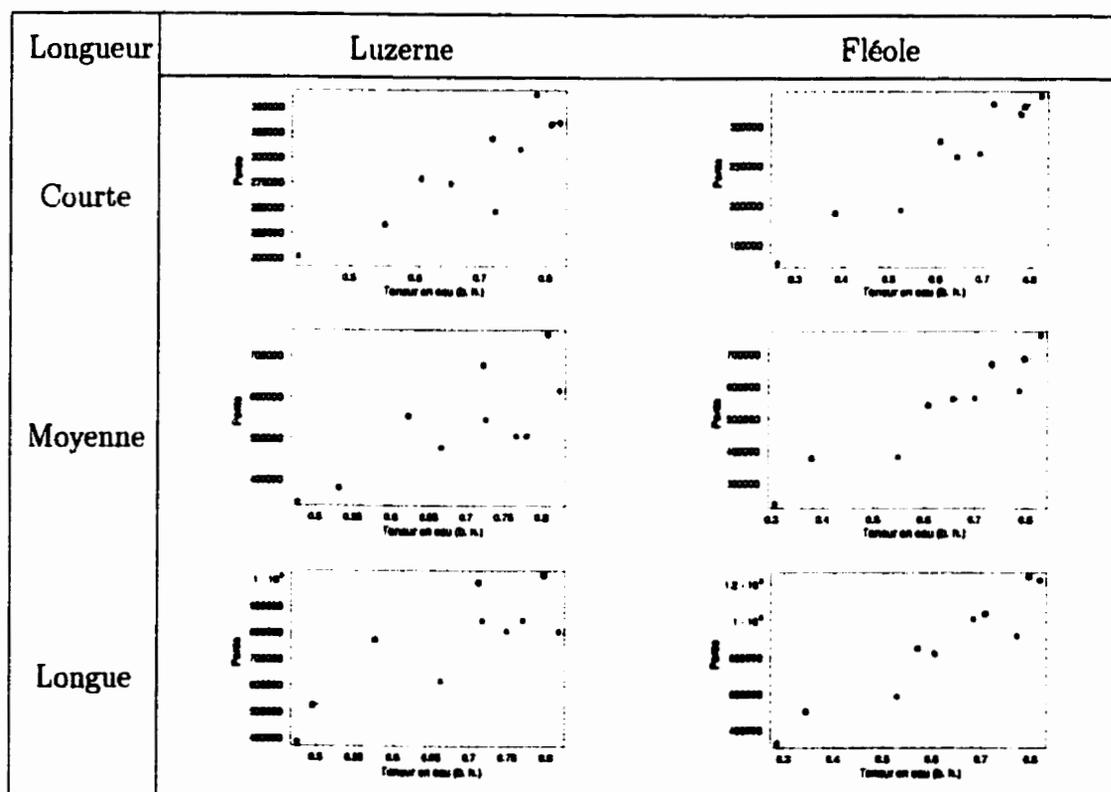


Figure 3.13 : Régressions linéaires de l'intensité des variations de fréquence (pente) en fonction de la teneur en eau selon l'espèce et la longueur de coupe.

Tableau 3.6 : Coefficients $a_{(j)}$ et $b_{(j)}$ obtenus pour chaque couple espèce-longueur de hachage.

Espèce	Longueur de hachage					
	Courte		Moyenne		Longue	
	$a_{(j)}$ (kHz/kg)	$b_{(j)}$ (kHz/kg)	$a_{(j)}$ (kHz/kg)	$b_{(j)}$ (kHz/kg)	$a_{(j)}$ (kHz/kg)	$b_{(j)}$ (kHz/kg)
Luzerne	354	46,7	823	-31,4	1344	-146,0
Fléole	372	30,5	858	-6,4	1576	-109,0

Prédictions

Quatre types de prédictions peuvent être envisagés à partir des régressions afin d'évaluer la précision du capteur capacitif. Ils sont décrits par les équations :

$$\Delta f' = \Delta f_b + (a_{(j)}h + b_{(j)}) d_s \quad (3.5)$$

$$d'_s = \frac{\Delta f - \Delta f_b}{a_{(j)}h + b_{(j)}} \quad (3.6)$$

$$h' = \frac{\Delta f - \Delta f_b}{a_{(j)}d_s} - \frac{b_{(j)}}{a_{(j)}} \quad (3.7)$$

$$h' = \frac{(a_{(j)} - b_{(j)}) \pm \sqrt{(a_{(j)} - b_{(j)})^2 - 4a_{(j)} \left(\frac{\Delta f - \Delta f_b}{d_h} - b_{(j)} \right)}}{2a_{(j)}} \quad (3.8)$$

où Δf représente la chute de fréquence du capteur capacitif (Hz), Δf_b la chute de fréquence due à la présence du bac vide (Hz), d_s et d_h les quantités de matière sèche et de matière humide (kg) et h la teneur en eau en base humide. Les apostrophes indiquent les variables prédites.

Ces équations correspondent, dans l'ordre, à la prédiction de :

- la chute de la fréquence d'oscillation à partir de la quantité de matière sèche du fourrage utilisé et de sa teneur en eau ;
- la quantité de matière sèche en fonction de la chute de la fréquence d'oscillation et de la teneur en eau ;

- la teneur en eau à partir de la chute de la fréquence d'oscillation et de la quantité de matière sèche ;
- la teneur en eau à partir de la chute de la fréquence d'oscillation et de la quantité de matière humide.

Les coefficients de régression corrigés obtenus avec ces prédictions sont présentés aux tableaux 3.7 à 3.10, de même que les erreurs RMS des valeurs prédites. Les valeurs obtenues avec chacune de ces prédictions sont comparées aux valeurs réelles aux figures C.1 à C.4. Les points en vert représentent l'emploi de matériel hâtif, ceux en bleu l'emploi de matériel à maturité intermédiaire et ceux en rouge, l'emploi de matériel tardif.

Tableau 3.7 : Coefficients de corrélation et erreurs de la prédiction de la chute de fréquence — quantité de matériel et teneur en eau connues.

Espèce	Longueur	r^2	Erreur RMS relative (%)
Luzerne	Courte	0,977	6,0
	Moyenne	0,942	9,9
	Longue	0,934	13,3
Fléole	Courte	0,964	9,0
	Moyenne	0,946	13,6
	Longue	0,941	16,9

3.5.2 Discussion

L'une des sources d'erreur les plus importantes dans la mesure de la teneur en eau et du débit de récolte de fourrages reste la variabilité même du fourrage d'un échantillon à l'autre. Cette variabilité peut être imputée au stade de maturité et aux conditions de croissance de la plante : type de sol, conditions climatiques... Il est possible dans bien des graphiques des figures C.1 à C.4 d'imaginer des multiplicateurs aux valeurs prédites qui dépendraient du stade de maturité ; les données recueillies avec du matériel de maturité intermédiaire semblent se comporter différemment de

Tableau 3.8 : Coefficients de corrélation et erreurs de la prédiction de la quantité de matériel — teneur en eau et chute de fréquence connues.

Espèce	Longueur	r^2	Erreur RMS relative (%)
Luzerne	Courte	0,951	11,2
	Moyenne	0,888	14,2
	Longue	0,866	17,0
Fléole	Courte	0,938	13,3
	Moyenne	0,886	16,2
	Longue	0,912	20,5

Tableau 3.9 : Coefficients de corrélation et erreurs de la prédiction de la teneur en eau — quantité de matériel sec et chute de fréquence connues.

Espèce	longueur	r^2	Erreur RMS abs. (%)
Luzerne	Courte	0,581	9,3
	Moyenne	0,527	9,9
	Longue	0,591	9,4
Fléole	Courte	0,782	9,4
	Moyenne	0,744	9,8
	Longue	0,737	10,9

Tableau 3.10 : Coefficients de corrélation et erreurs de la prédiction de la teneur en eau — quantité de matériel humide et chute de fréquence connues.

Espèce	Longueur	r^2	Erreur RMS abs. (%)
Luzerne	Courte	0,777	6,8
	Moyenne	0,689	8,3
	Longue	0,800	8,4
Fléole	Courte	0,776	8,6
	Moyenne	0,784	8,9
	Longue	0,688	11,9

celles recueillies avec du matériel aux autres stades. Ces ajustements n'ont pas été effectués afin que les taux d'erreurs obtenus par notre modèle soient valides pour différents lots de fourrage pouvant être à des stades de maturité divers.

Bien que toutes les régressions effectuées soient linéaires, l'équation 3.8 est quadratique. De plus, ses deux solutions sont réalistes, de sorte qu'on ne peut en rejeter une par simple inspection. Ces deux solutions sont symétriques par rapport à une valeur critique qui dépend de l'espèce et de la longueur de coupe; cette valeur correspond au sommet de la parabole décrite par l'équation 3.8. La présence de deux solutions lors de la prédiction de la teneur en eau à partir du débit humide impose donc l'utilisation d'un autre capteur pouvant au moins indiquer si le fourrage est plus ou moins humide que la valeur critique. Les graphiques de la figure C.4 montrent en couleurs pâles les solutions rejetées. Le critère de rejet utilisé est la plus grande erreur par rapport à la vraie valeur. Il arrive cependant que l'on obtienne pour certains essais des solutions imaginaires. Lorsque c'était le cas, la valeur la plus susceptible de verser dans l'espace complexe à cause de l'erreur expérimentale, soit la valeur critique, leur a été substituée. Ces essais sont représentés par des couleurs d'intensité moyenne.

Des équations quadratiques permettent de mieux décrire la relation entre la chute de fréquence du capteur capacitif et la quantité de matériel sec pour une teneur en eau, une longueur de hachage et une espèce donnée (surtout lorsque la quantité de matériel est élevée). Bien que l'utilisation de ces équations permettrait de réduire les erreurs obtenues lors des prédictions au sein d'un même stade de maturité (erreurs principalement visibles avec les données tardives de la figure C.2), les erreurs causées par la variabilité du fourrage sont tout aussi importantes. Comme le nombre de mesures prises avec des quantités de matériel très élevées est faible, rendant difficile la caractérisation de l'augmentation de la pente avec l'élévation de la quantité de fourrage, l'utilisation de simples relations linéaires a été privilégiée.

Un moyen pouvant accroître la précision d'un capteur capacitif est d'utiliser une fréquence d'oscillation plus élevée. Cette modification pourrait davantage mettre en évidence le comportement diélectrique de l'eau. Si les variations du champ électrique

sont trop lentes (donc si la fréquence d'oscillation est trop faible), les charges dissoutes dans les particules de fourrage ont le temps de migrer au pourtour des particules jusqu'à ce qu'un équilibre électrostatique soit atteint à l'intérieur des particules. Comme cet équilibre n'est atteint que pour un champ électrique nul, la capacité effective du condensateur sera augmentée car pour un nombre de charges sur les plaques constant, la tension, qui est donnée par l'intégration du champ électrique ($V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$) entre les deux plaques, sera réduite (la capacité en Farad d'un condensateur est définie par $C = Q/V$ où Q est le nombre de charge en Coulomb sur les plaques du condensateur et V est la tension en volt entre les deux plaques). À fréquence d'oscillation plus élevée, ce capteur serait moins sensible à la grosseur et à la forme des particules dans la chute et, par le fait même, aux différences de longueur de coupe. De plus, comme la luzerne a une forme plus complexe que la fléole, il est possible que les plus grandes différences observées pour la luzerne entre les niveaux de maturité soient dues justement à une modification de cette forme (présence ou absence de fleurs, importance des feuilles par rapport à la tige. ...).

3.5.3 Conclusion

La fréquence du capteur capacitif présente des dépendances importantes par rapport au débit, à la teneur en eau, à l'espèce et à la longueur des particules du fourrage. Ces dépendances peuvent être décrites adéquatement par des relations linéaires sauf lorsque le débit est très élevé. Un modèle indépendant du stade de maturité permettant de relier la teneur en eau, le débit de récolte et la fréquence d'oscillation pour une espèce et une longueur de coupe donnée a été développé à partir d'essais statiques. Ce modèle a une erreur RMS relative moyenne de 15,4 % sur la prédiction du débit lorsque la teneur en eau est connue. L'erreur RMS absolue moyenne sur la teneur en eau est de 9,8 % (base humide) lorsque le débit sec est connu, et de 8,8 % (base humide) lorsque le débit humide est connu. Ce modèle est valide pour des teneurs en eau variant entre 45 % et 80 % pour de la luzerne et entre 30 % et 80 % pour de la fléole (base humide).

La caractérisation statique d'un capteur capacitif semble être un moyen efficace de déterminer ses performances en situation de récolte. Des dépendances semblables à celles trouvées lors des essais dynamiques (relation linéaire entre le signal et le débit, et un signal plus faible pour des particules plus petites) ont été identifiées. Des essais au champ permettraient de vérifier si les coefficients du modèle restent valides lorsque le matériel est soufflé dans la chute au lieu d'y être simplement déposé.

CONCLUSION

Le présent projet de recherche avait comme objectif l'évaluation de quatre capteurs afin de déterminer leur comportement face à des variations de débit ou de teneur en eau. Les capteurs sont : un capteur de déplacement mesurant l'écartement des rouleaux d'alimentation de la fourragère, un capteur de force mesurant la force exercée par le fourrage soufflé contre la paroi de la chute, un capteur capacitif constitué d'un oscillateur utilisant dans son circuit de résonance un condensateur au sein duquel circule le fourrage et un capteur d'occupation mesurant le volume de la chute occupé par le fourrage. À partir des observations au champ en 1997 et en laboratoire en 1998, on peut tirer les conclusions suivantes :

1. Les capteurs de déplacement, de force et capacitif peuvent déterminer le débit de récolte d'un type particulier de fourrage à une teneur en eau précise. Les capteurs de déplacement et de force nécessitent l'utilisation de filtres passe-bas pour atténuer les vibrations produites par le déplacement et l'utilisation de la fourragère.
2. Le capteur capacitif peut de plus prédire à environ 10 % près la teneur en eau de fourrages indépendamment de leur stade de maturité lorsque le débit de récolte est connu. La connaissance du débit humide génère cependant deux valeurs de teneur en eau dont aucune ne peut être rejetée sans autre indication sur la teneur en eau réelle.
3. Le capteur capacitif est fortement affecté par la taille des particules du fourrage qui le traverse.
4. Le capteur d'occupation est trop sensible à la présence de particules très fines pour évaluer le volume occupé par l'écoulement de fourrage.

Les principes physiques sur lesquels sont basés les capteurs de déplacement et de force amènent à favoriser ce dernier pour déterminer le débit de récolte. Sa dépendance envers des variations de teneur en eau est plus facilement prévisible étant donné que sa mesure dépend en théorie directement du débit humide récolté. Les résultats obtenus avec le capteur capacitif incitent également à suggérer l'essai de capteurs similaires mais employant des fréquences d'oscillation plus élevées. L'utili-

sation de telles fréquences permettrait de réduire les mouvements des porteurs de charge (électrons et ions) dans le fourrage, ce qui mettrait davantage en évidence le comportement diélectrique du fourrage. Comme l'eau présente dans le fourrage est en grande partie responsable du comportement diélectrique, le capteur capacitif serait moins sensible aux autres sources de variation.

Bibliographie

ANTHONY, W. S. 1991. Field evaluation of infrared moisture meters. *Applied Engineering in Agriculture* 7(5): 509-514.

ASAE 1993. ASAE Standards 1993. ASAE, St. Joseph.

AUERNHAMMER, H., M. DEMMEL et P. J. M. PIRRO. 1995. Yield measurement on self propelled forage harvesters. Communication numéro 951757, ASAE, St. Joseph.

BARNETT, N. G. et K. J. SHINNERS. 1998. Analysis of systems to measure mass-flow-rate and moisture on a forage harvester. Communication numéro 981118, ASAE, St. Joseph.

BECK, M. S., R. G. GREEN et R. THORN. 1987. Non-intrusive measurement of solids mass flow in pneumatic conveying. *Journal of Physics E: Sci. Instrum.* 20: 835-840.

BULL, C. R. 1990. A model of the reflectance of near-infrared radiation. *Journal of Modern Optics* 37(12): 1955-1964.

BULL, C. R. 1991a. Compensation for particle size effects in near infrared reflectance. *Analyst* 116(aout): 781-786.

BULL, C. R. 1991b. Wavelength selection for near-infrared reflectance moisture meters. *Journal of Agricultural Engineering Research* 49: 113-125.

BULL, C. R. 1993. Calibration of a near infrared reflectance moisture meter for grass. *Journal of Agricultural Engineering Research* 54: 177-185.

CHUNG, J. H. et L. R. VERMA. 1991a. Measurement of rice moisture during drying using resistance-type sensors. *Applied Engineering In Agriculture* 7(5): 630-635.

CHUNG, J. H. et L. R. VERMA. 1991b. Dynamic and quasi-static rice moisture models using humidity sensors. *Transactions of the ASAE* 34(6): 2477-2483.

DEAN, S. K. 1955. Flow-meter for granular materials. *Engineering*: 430-431.

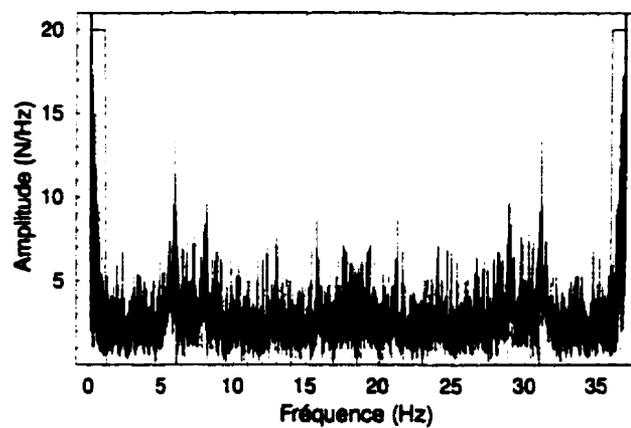
GREEN, R. G., H. K. KWAN, R. JOHN et M. S. BECK. 1978. A low-cost solids flowmeter for industrial use. *Journal of Physics E: Sci. Instrum.* 11: 1005-1010.

- KANDALA, C. V. K., R. G. LEFFLER, S. O. NELSON et K. C. LAWRENCE. 1987. Capacitive sensors for measuring single-kernel moisture content in corn. *Transactions of the ASAE* 30(3): 793-797.
- KANDALA, C. V. K., S. O. NELSON et K. C. LAWRENCE. 1988. Moisture determination in single kernels of corn – a nondestructive method. *Transactions of the ASAE* 31(6): 1890-1895.
- LAWRENCE, K. C., S. O. NELSON et A. W. KRASZEWSKI. 1991. Temperature-dependent model for the dielectric constant of soft red winter wheat. *Transactions of the ASAE* 34(5): 2091-2093.
- MAINS, W. H., H. P. HARRISON et R. HIRONAKA. 1984. Feedroll displacement on a forage harvester as a measurement of the throughput of harvested crops. *Agricultural Electronics—1983 and beyond* 1: 52-59.
- MEXAS S. et G. H. BRUSEWITZ. 1987. Acoustic grain moisture meter. *Transactions of the ASAE* 30(3): 853-857.
- NELSON, S. O. 1965. Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-MC range. *Transactions of the ASAE* 8: 38-43.
- NELSON, S. O. 1979. RF and microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn. *Transactions of the ASAE* 22(6): 1451-1457.
- NELSON, S. O. 1984. Moisture, frequency, and density dependence of the dielectric constant of shelled, yellow-dent field corn. *Transactions of the ASAE* 27: 1573-1578,1585.
- NELSON, S. O. 1992. Correlating dielectric properties of solids and particulate samples through mixture relationships. *Transactions of the ASAE* 35(2): 625-629.
- NELSON, S. O., K. C. LAWRENCE, et C. V. K. KANDALA. 1990. Comparison of RF impedance and DC conductance sensing for single-kernel moisture measurement in corn. *Transactions of the ASAE* 33(2): 637-641.
- NELSON, S. O., A. W. KRASZEWSKI, C. V. K. KANDALA et K. C. LAWRENCE. 1992. High-frequency and microwave single-kernel moisture sensors. *Transactions of the ASAE* 35(4): 1309-1314.
- NELSON, S. O. et K. C. LAWRENCE. 1989. Evaluation of a crushing-roller conductance instrument for single-kernel corn moisture measurement. *Transactions of the ASAE* 32(2): 737-743.
- NELSON, S. O. et K. C. LAWRENCE. 1993. Nondestructive single-seed moisture determination in soybeans by RF impedance measurements. *Transactions of the ASAE* 36(6): 1855-1859.

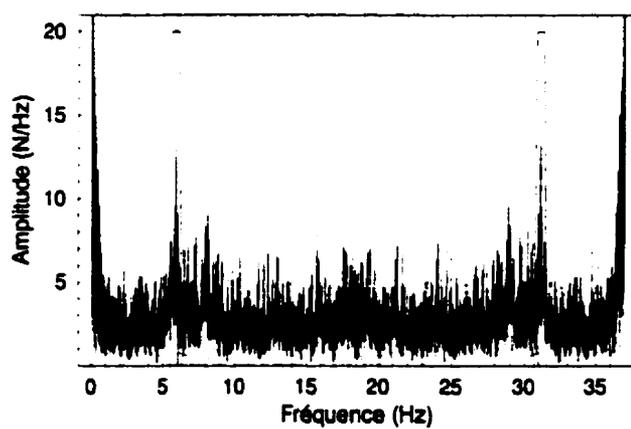
- POWELL, S. D., B. D. MCLENDON, S. O. NELSON, A. KRASZEWSKI et J. M. ALLISON. 1988. Use of a density-independent function and microwave measurement system for grain moisture measurement. *Transactions of the ASAE* 31(6): 1875-1881.
- PROVENCHER, P. 1988. Détection du degré d'humidité par mesures combinées. *École des gradués de l'Université Laval, Faculté des sciences et de génie*.
- SHENK, J. S et M. O. WESTERHAUS. 1985. Accuracy of NIRS instruments to analyse forage and grain. *Crop Science* 25(6): 1120-1122.
- WALDIE, A. H. 1983. Microprocessor-based cotton moisture sensor design and development. *ASAE Publ. 9-84, Agricultural Electronics—1983 and beyond*, ASAE, St. Joseph: 758-765.
- WALDIE, A. H., S. E. HUGHS et M. N. GILLUM. 1983. Automatic moisture sensor for measurement and control of cotton ginning processes. *Journal of Engineering for Industry* 105: 27-30.
- WALDIE, A. H. et S. E. HUGHS, M. N. GILLUM. 1984. Electronic moisture sensor performance in commercial gin environments. *Transactions of the ASAE* 27: 1600-1602.
- WATSON, C. A., W. T. GREENAWAY, G. DAVIS et R. J. MCGINTY. 1979. Rapid proximate method for determining moisture content of single kernels of corn. *Cereal Chemistry* 56(3): 137-140.
- WINDHAM, W. R. et F. E. BARTON. 1991. Moisture analysis in forage by near-infrared reflectance spectroscopy: collaborative study of calibration methodology. *J. Assoc. Off. Anal. Chem* 74(2): 324-331.
- ZOERB, G. C., G. A. MOORE et R. P. BURROW. 1993. Continuous measurement of grain moisture content during harvest. *Transactions of the ASAE* 36(1): 5-9.

Annexe A

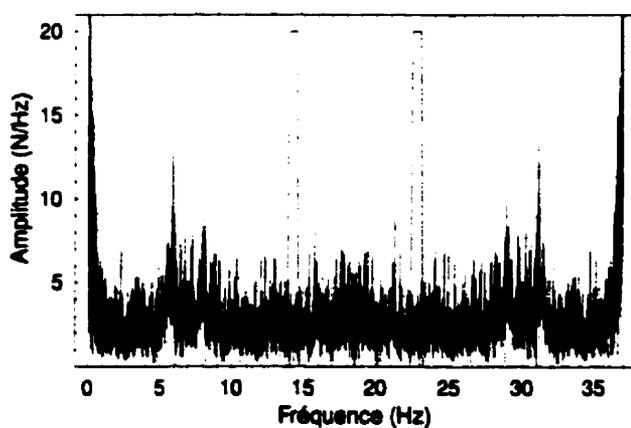
Graphiques des résultats des capteurs de déplacement et de force au champ



(a) Avec filtre passe-bas

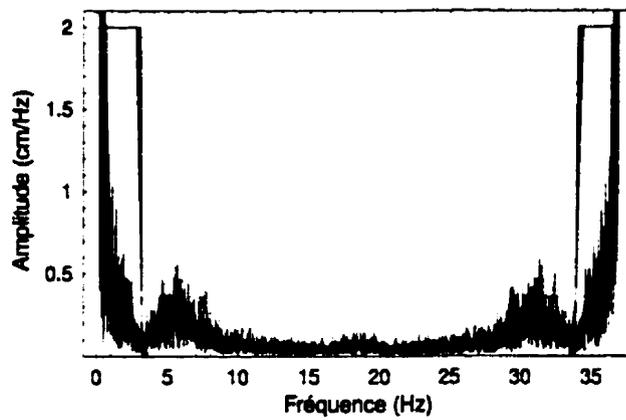


(b) Avec filtre passe-bande à la résonance

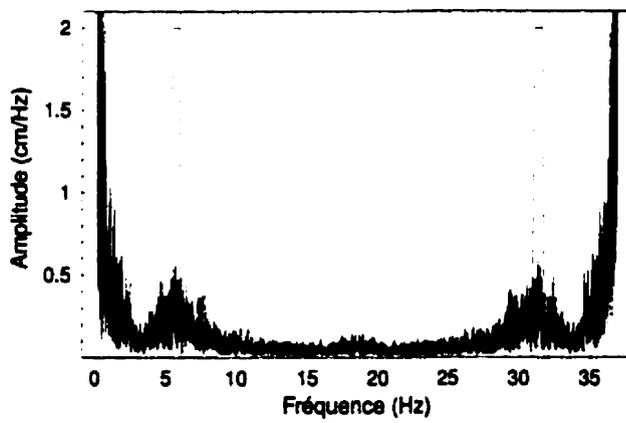


(c) Avec filtre passe-bande à haute fréquence

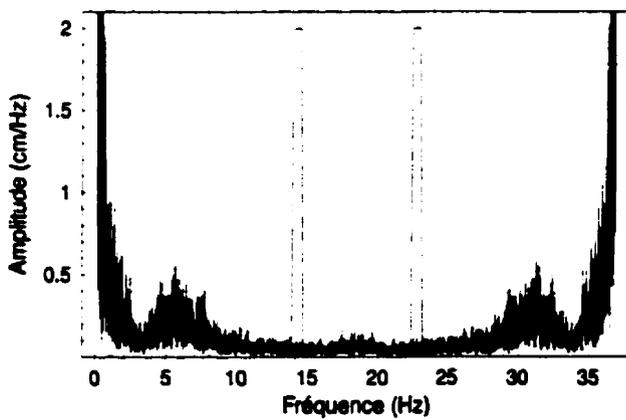
Figure A.1 : Spectre typique du capteur de force.



(a) Avec filtre passe-bas

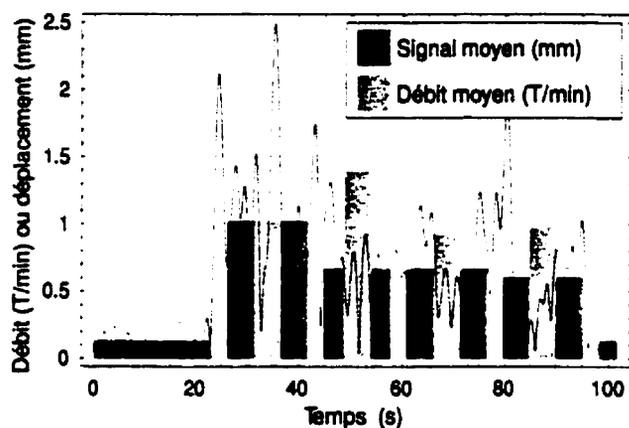


(b) Avec filtre passe-bande à la résonance

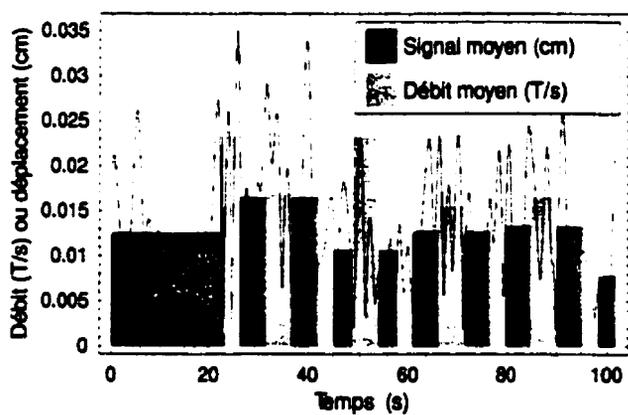


(c) Avec filtre passe-bande à haute fréquence

Figure A.2 : Spectre typique du capteur de déplacement.

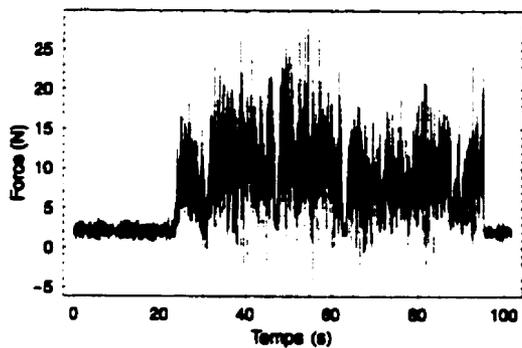


(a) Avec filtre passe-bande à la résonance

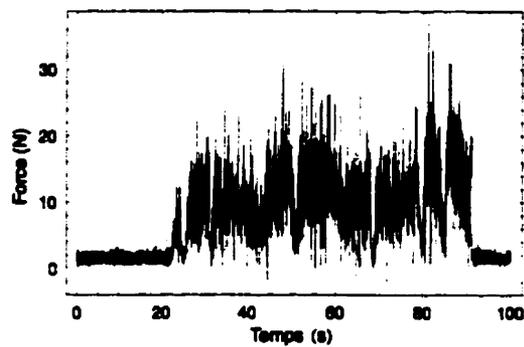


(b) Avec filtre passe-bande à haute fréquence

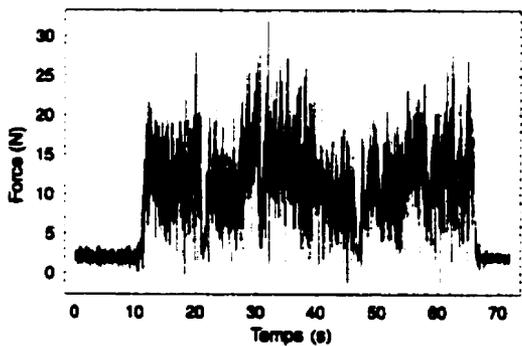
Figure A.3 : Données typiques du capteur de déplacement.



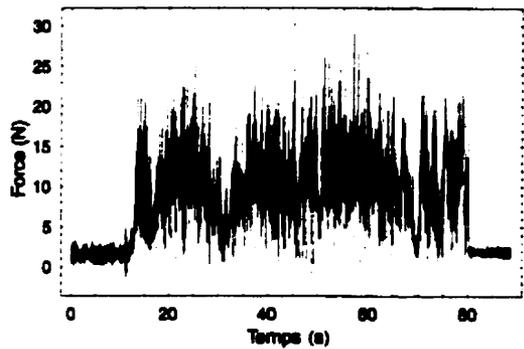
(a) Essai 1



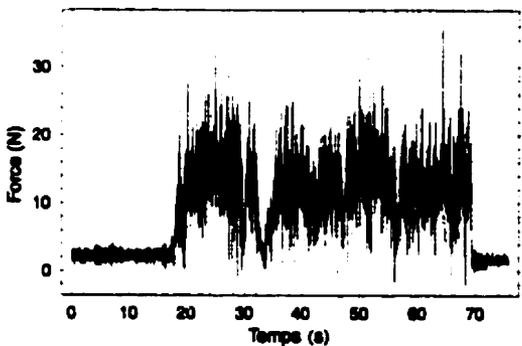
(b) Essai 4



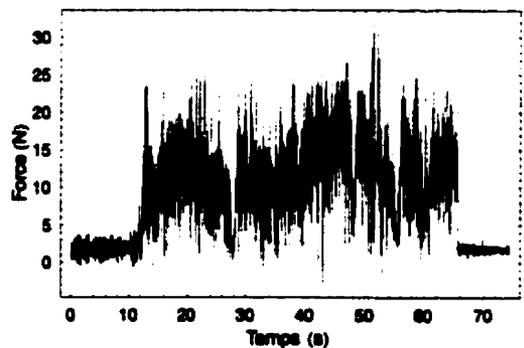
(c) Essai 2



(d) Essai 5

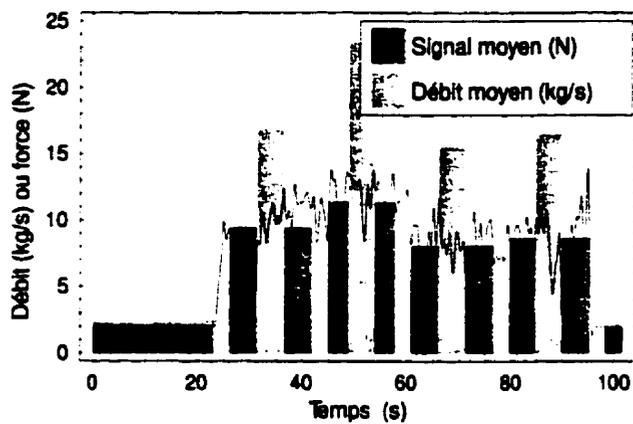


(e) Essai 3

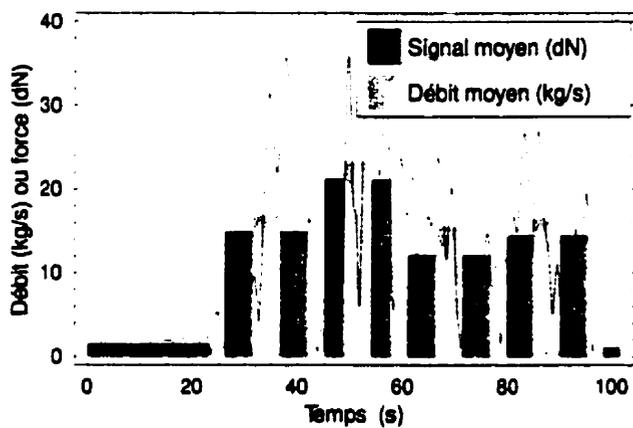


(f) Essai 6

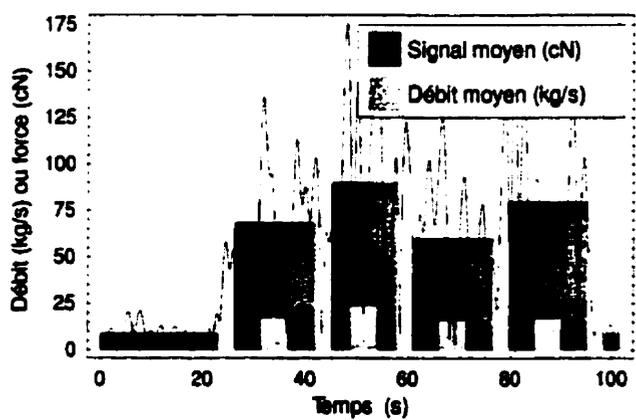
Figure A.4 : Capteur de force : signal brut.



(a) Filtre passe-bas

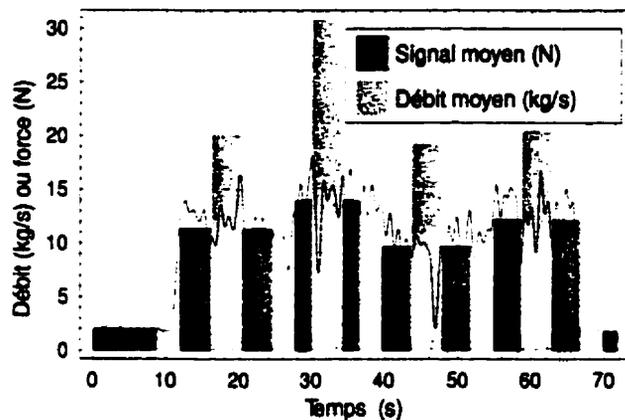


(b) Filtre passe-bande à la résonance

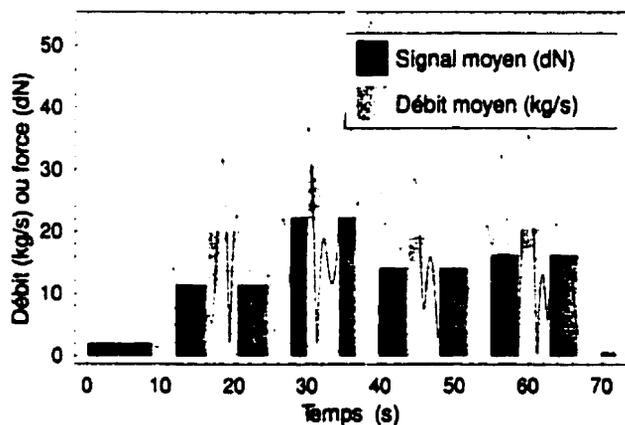


(c) Filtre passe-bande à haute fréquence

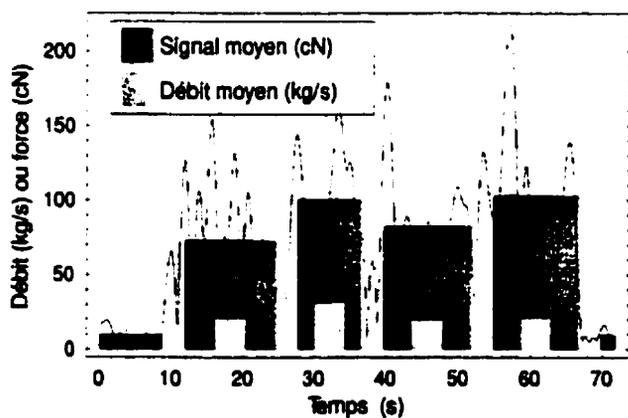
Figure A.5 : Capteur de force : essai 1



(a) Filtre passe-bas

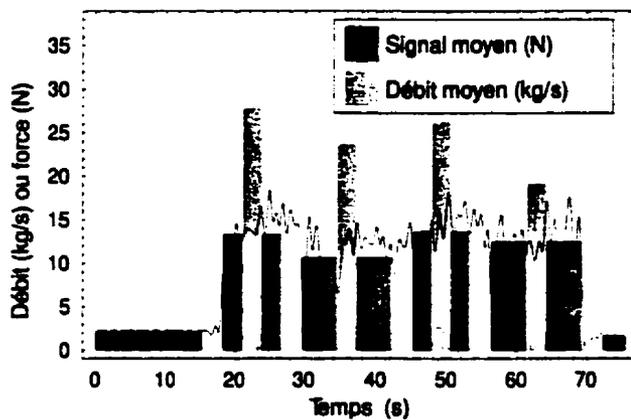


(b) Filtre passe-bande à la résonance

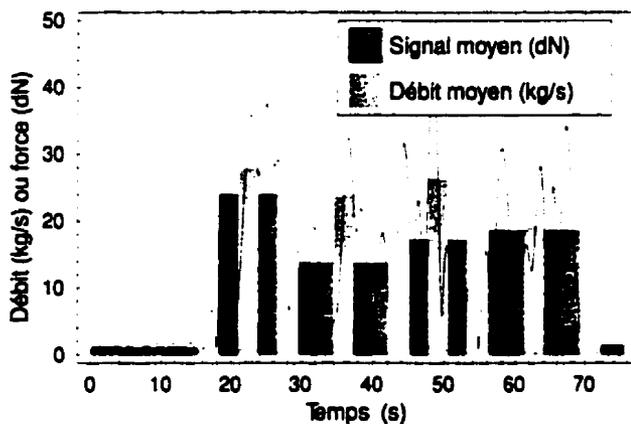


(c) Filtre passe-bande à haute fréquence

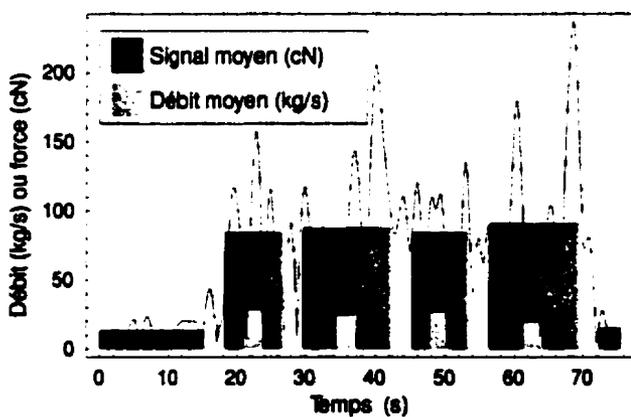
Figure A.6 : Capteur de force : essai 2



(a) Filtre passe-bas

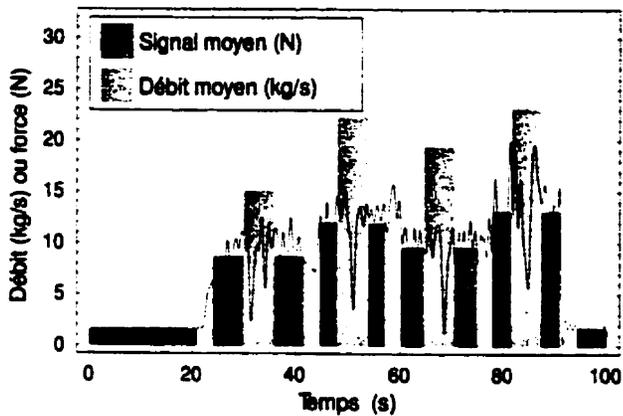


(b) Filtre passe-bande à la résonance

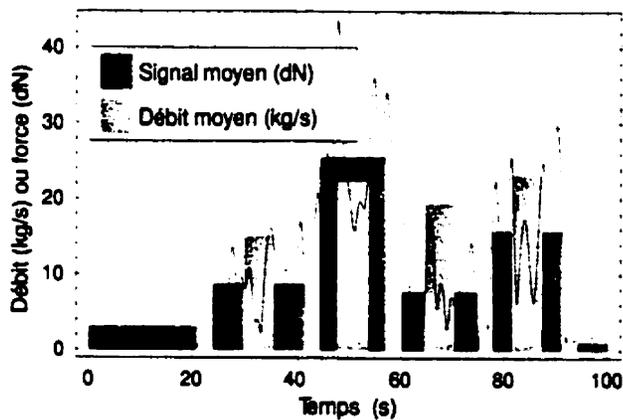


(c) Filtre passe-bande à haute fréquence

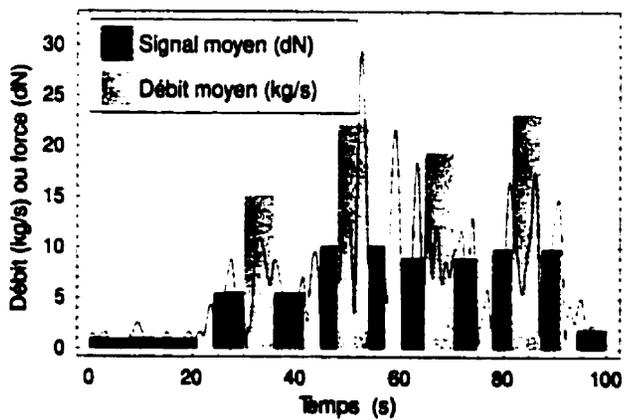
Figure A.7 : Capteur de force : essai 3



(a) Filtre passe-bas

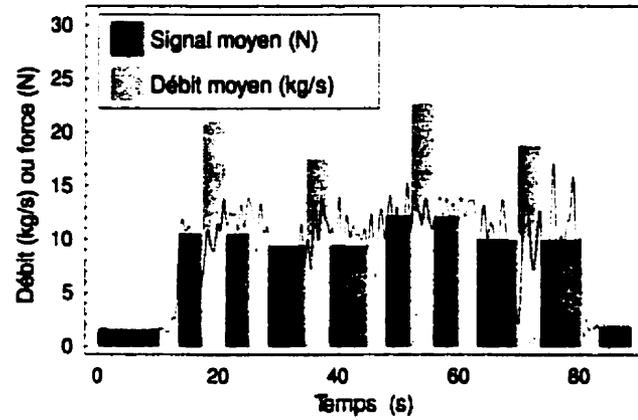


(b) Filtre passe-bande à la résonance

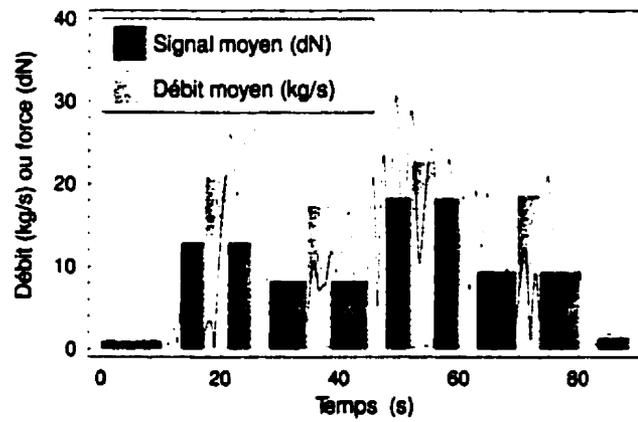


(c) Filtre passe-bande à haute fréquence

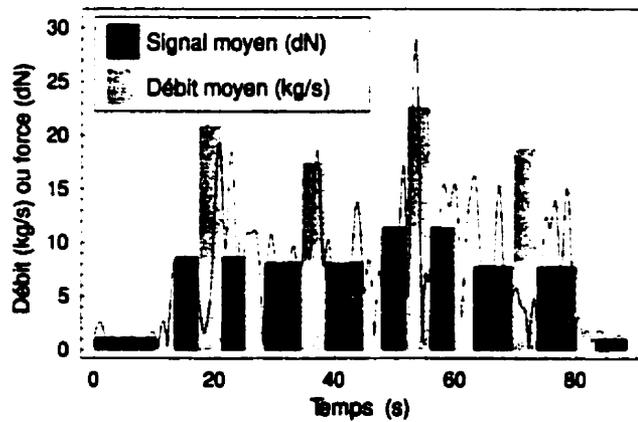
Figure A.8 : Capteur de force : essai 4



(a) Filtre passe-bas

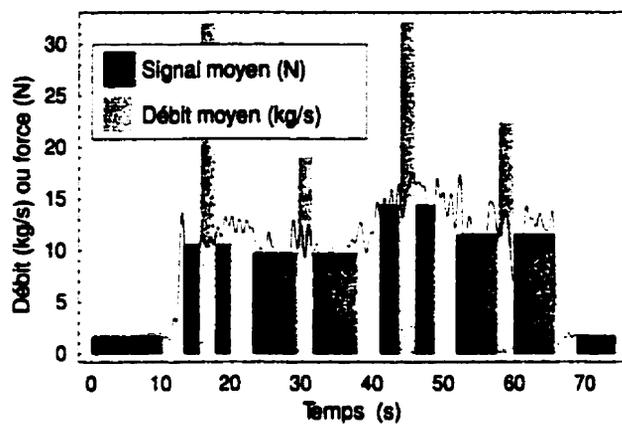


(b) Filtre passe-bande à la résonance

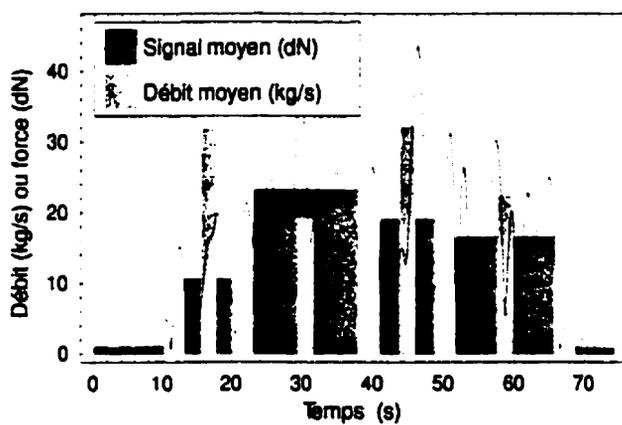


(c) Filtre passe-bande à haute fréquence

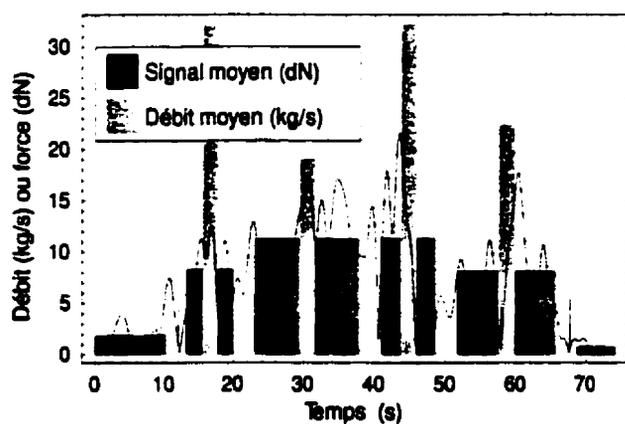
Figure A.9 : Capteur de force : essai 5



(a) Filtre passe-bas

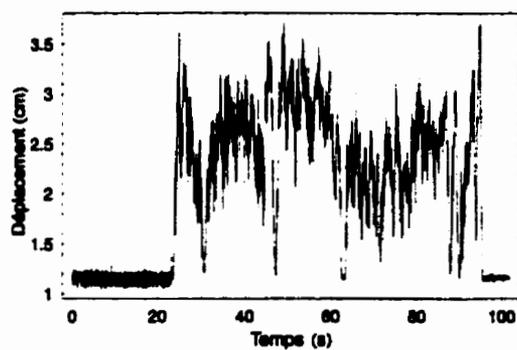


(b) Filtre passe-bande à la résonance

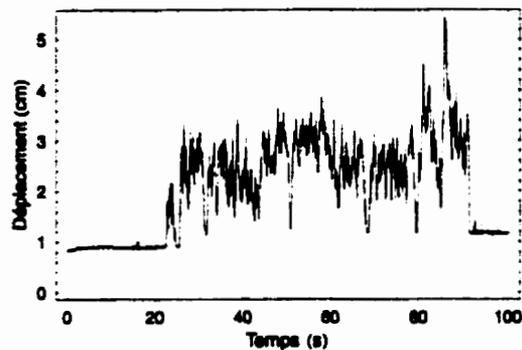


(c) Filtre passe-bande à haute fréquence

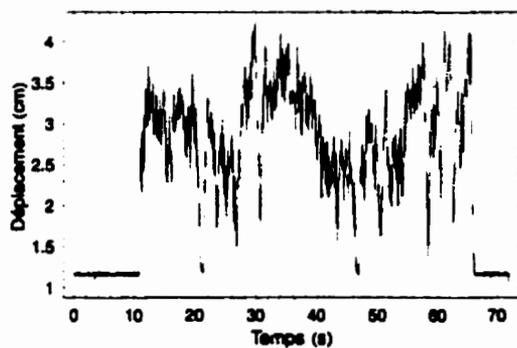
Figure A.10 : Capteur de force : essai 6



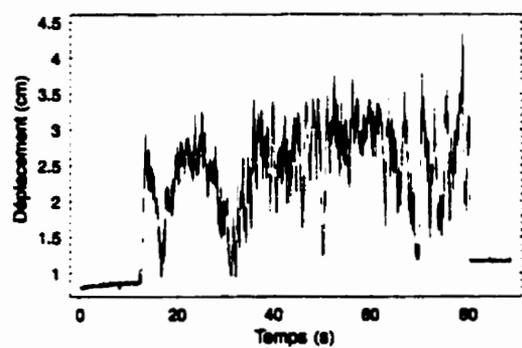
(a) Essai 1



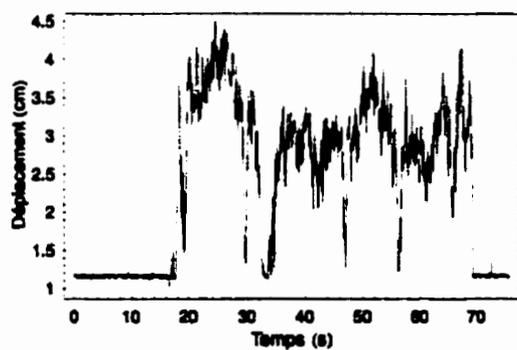
(b) Essai 4



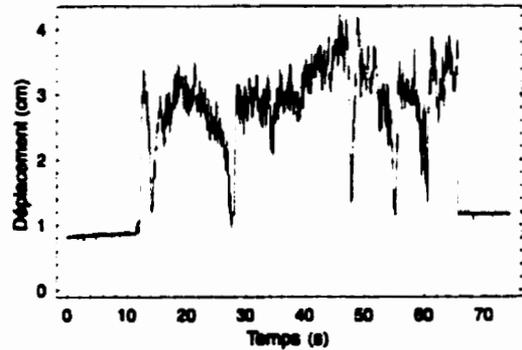
(c) Essai 2



(d) Essai 5

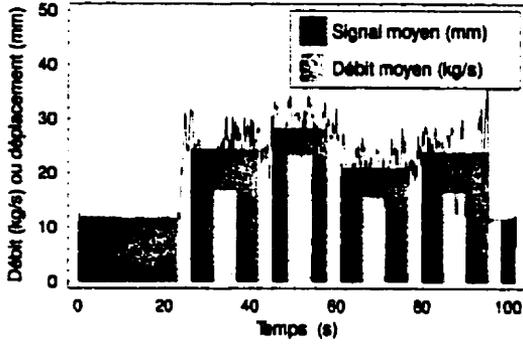


(e) Essai 3

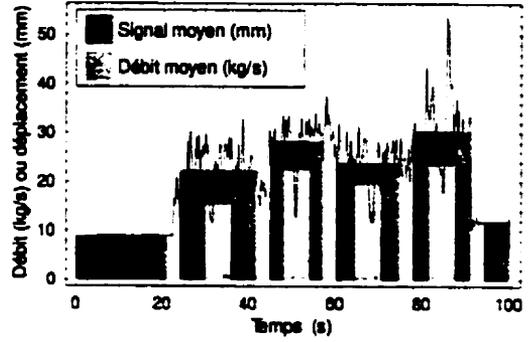


(f) Essai 6

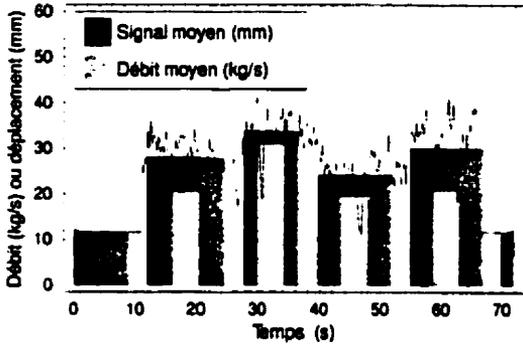
Figure A.11 : Capteur de déplacement : signal brut.



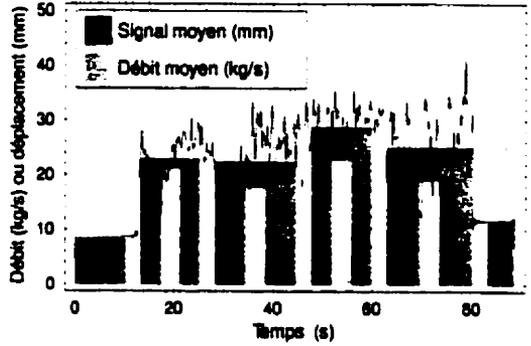
(a) Essai 1



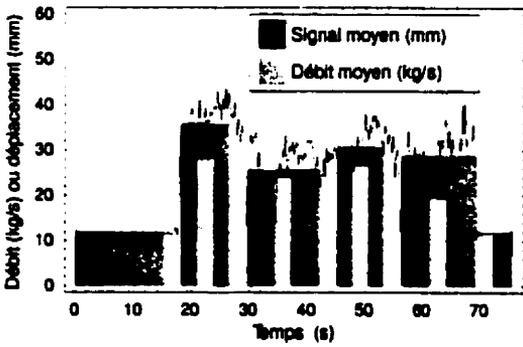
(b) Essai 4



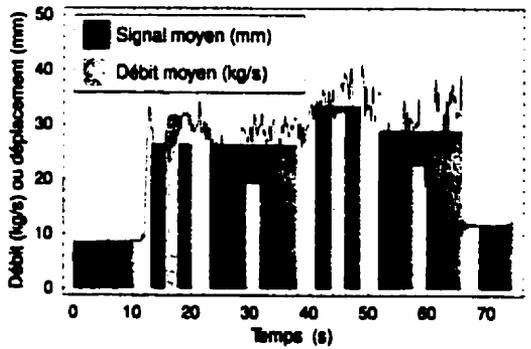
(c) Essai 2



(d) Essai 5



(e) Essai 3



(f) Essai 6

Figure A.12 : Capteur de déplacement : filtre passe-bas.

Annexe B

Essais dynamiques au laboratoire

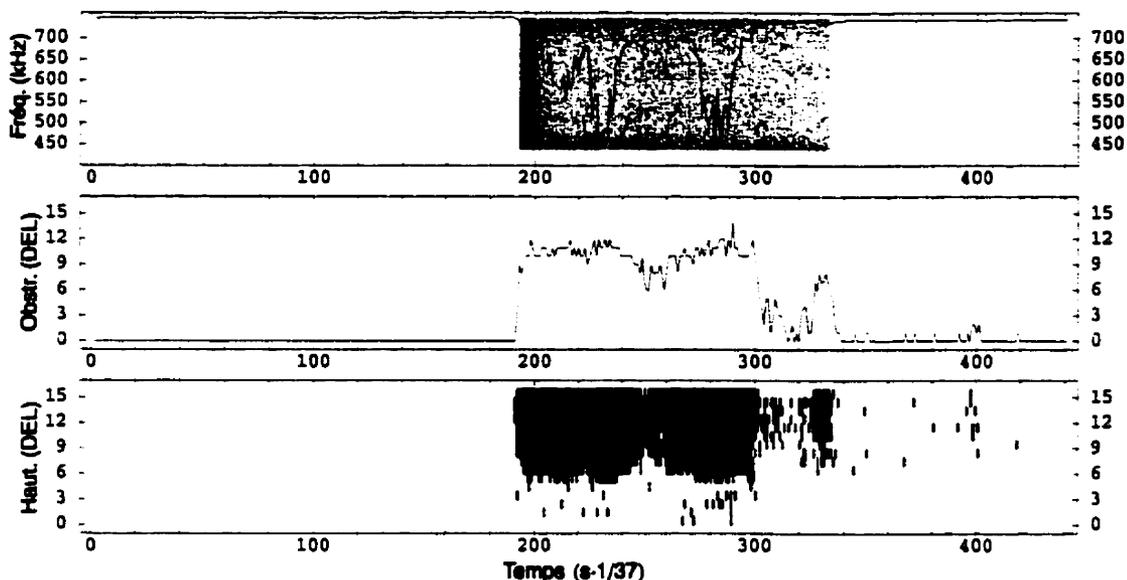


Figure B.1 : Données recueillies lors du premier essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes (les points noirs indiquent la hauteur des faisceaux obstrués).

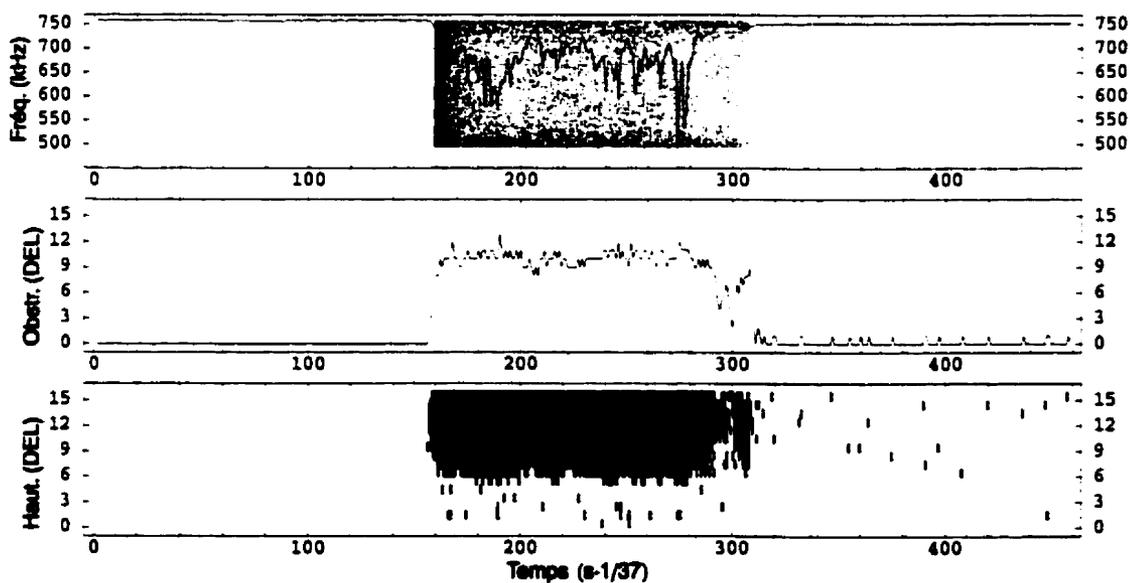


Figure B.2 : Données recueillies lors du deuxième essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes.

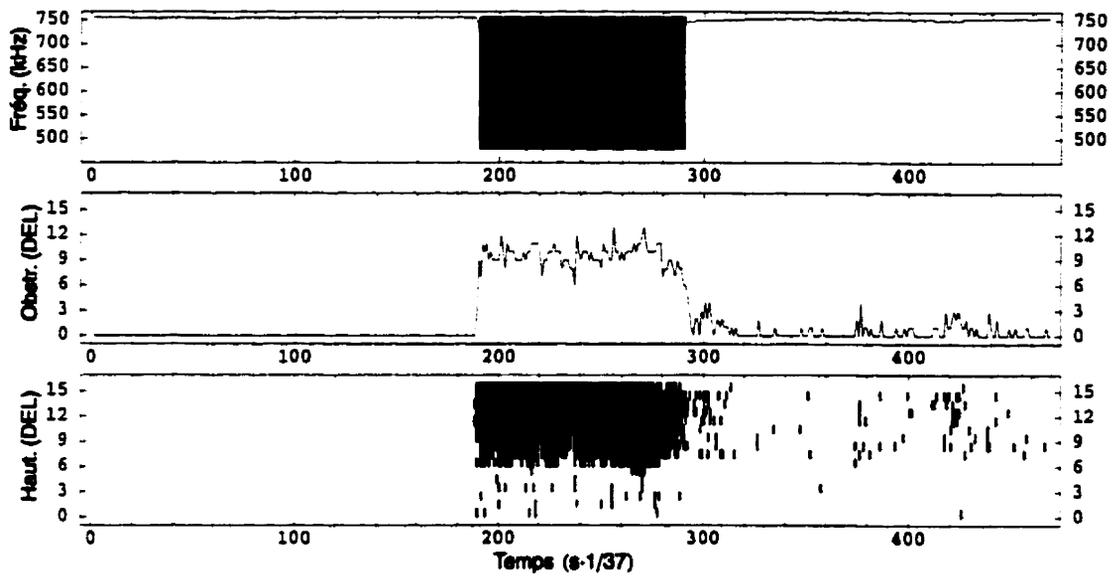


Figure B.3 : Données recueillies lors du troisième essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes.

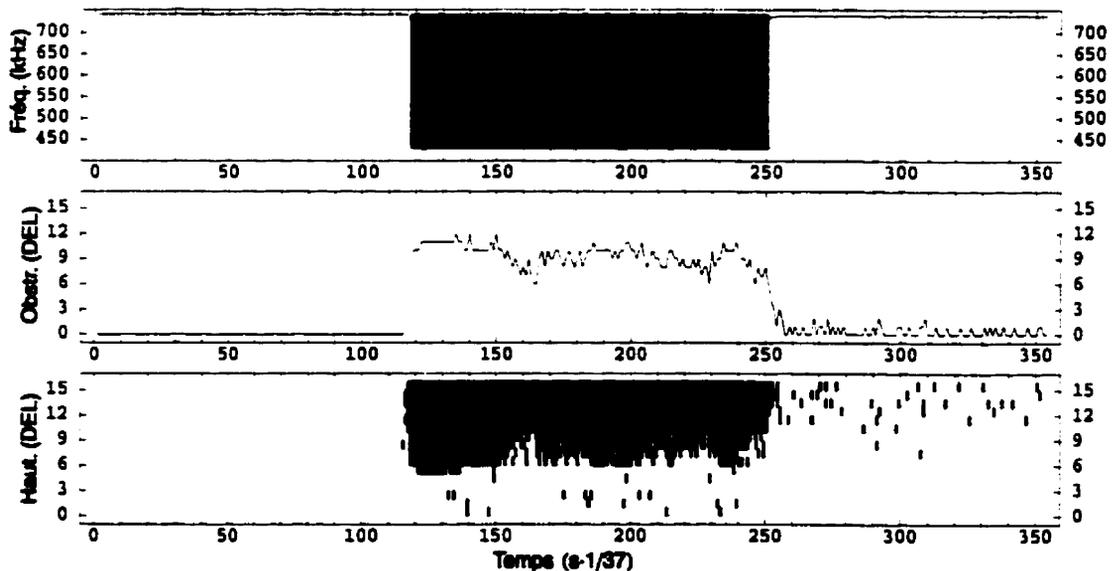


Figure B.4 : Données recueillies lors du quatrième essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes.

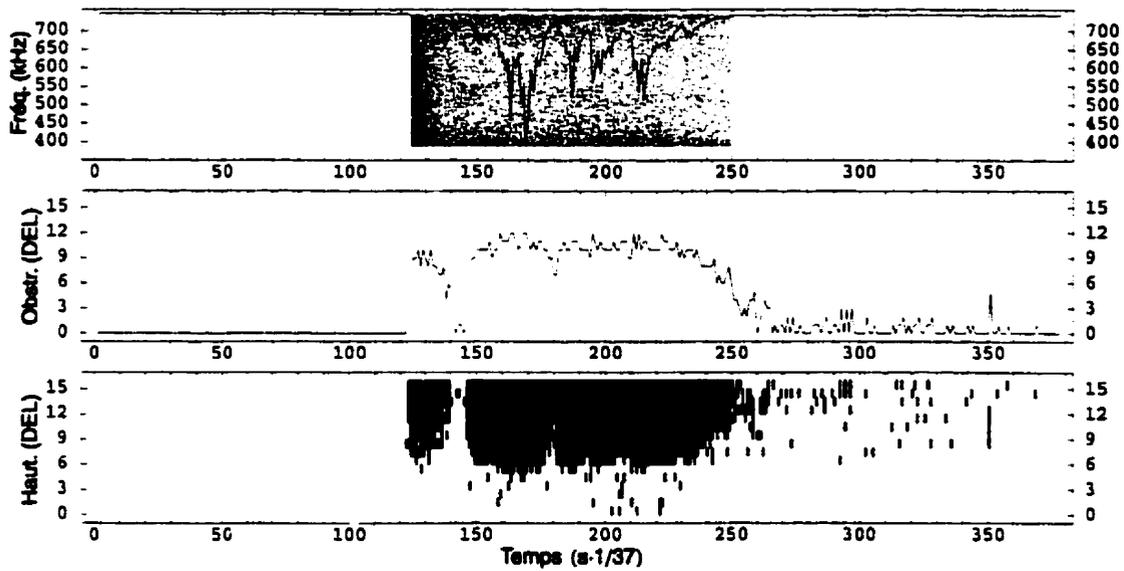


Figure B.5 : Données recueillies lors du cinquième essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes.

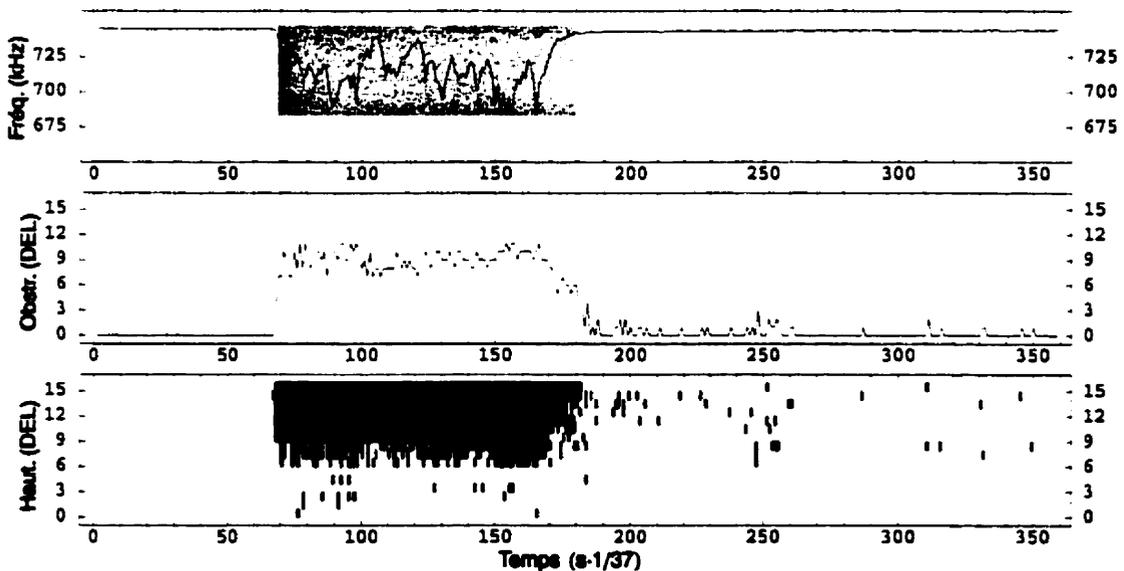


Figure B.6 : Données recueillies lors du sixième essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes.

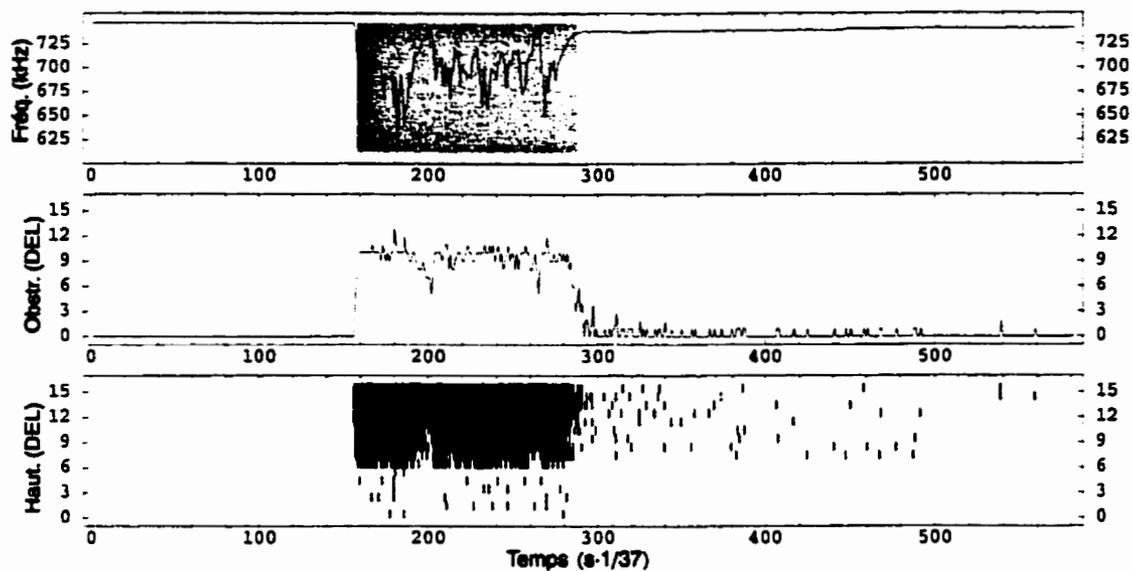


Figure B.7 : Données recueillies lors du septième essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes.

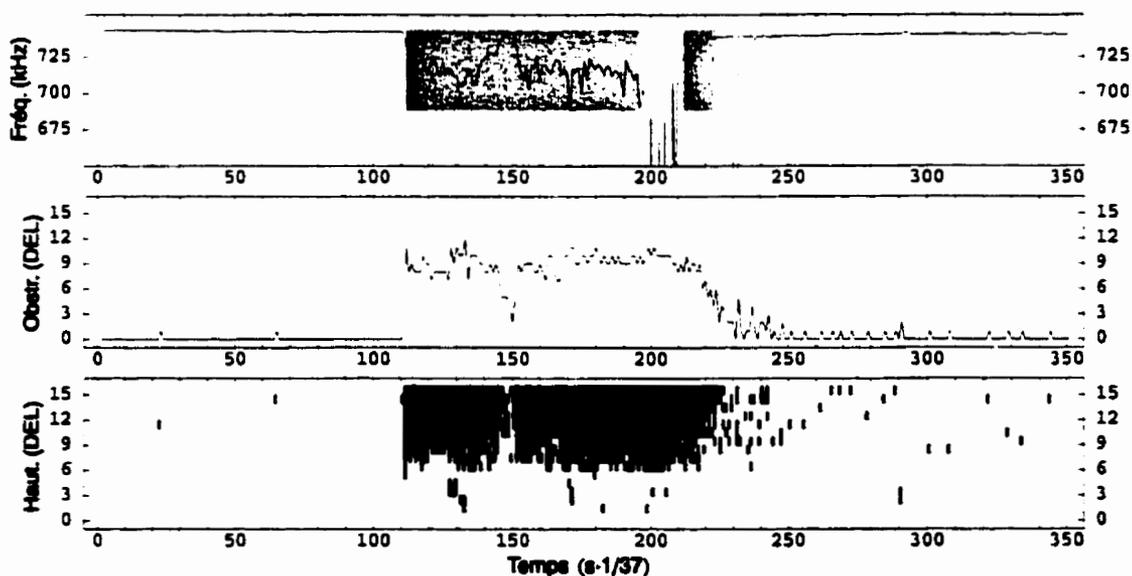


Figure B.8 : Données recueillies lors du huitième essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes.

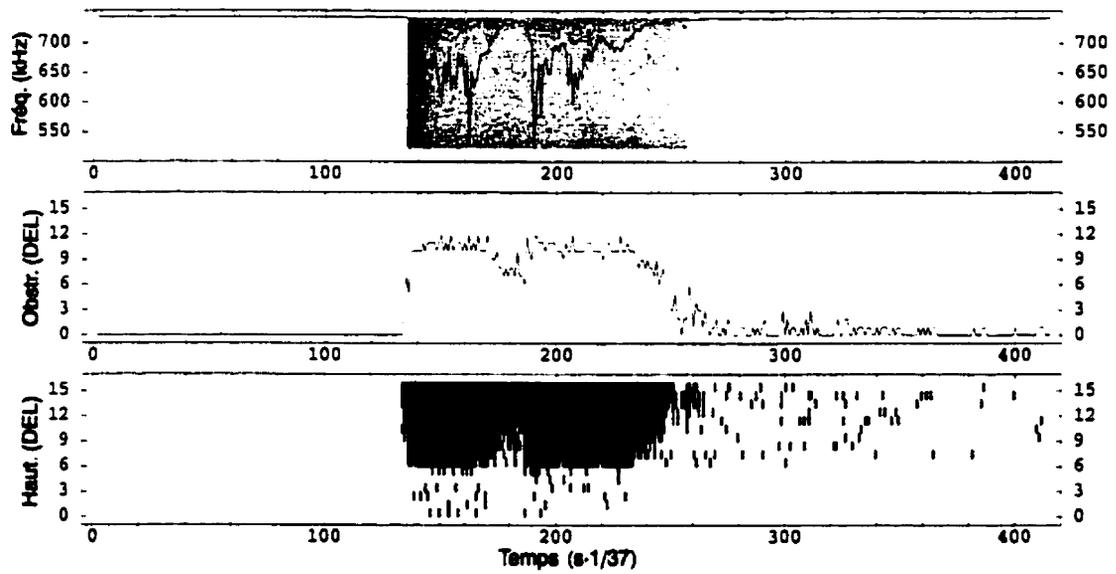


Figure B.9 : Données recueillies lors du neuvième essai du second bloc. De haut en bas : signal de l'oscillateur, nombre de diodes dont le faisceau est coupé par le maïs et signaux des diodes.

Annexe C

**Prédictions obtenues par la caractérisation
du capteur capacitif**

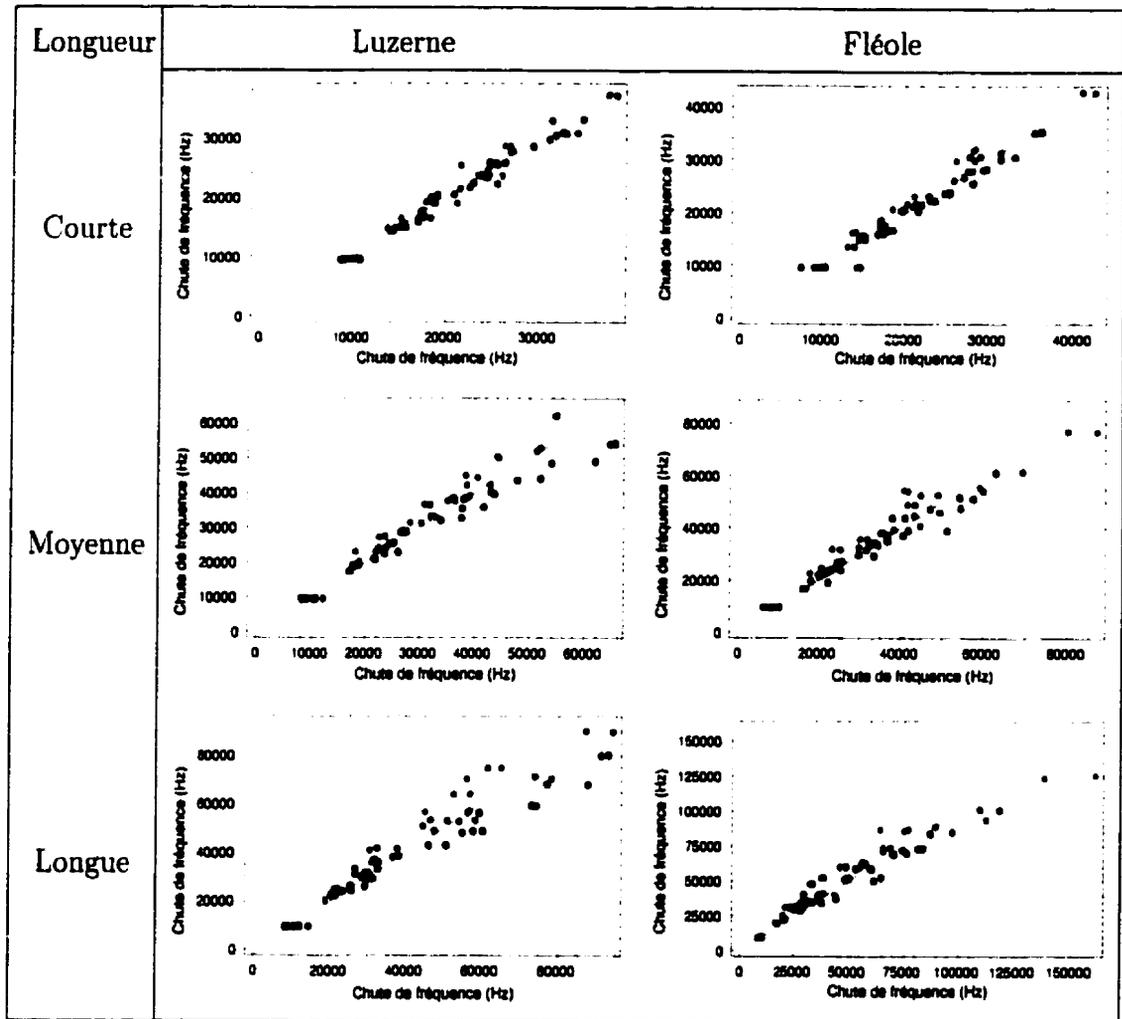


Figure C.1 : Prédiction de la chute de fréquence d'oscillation (équation 3.5) vs la chute de fréquence expérimentale lorsque la teneur en eau et la masse du matériel sont connues. Le matériel hâtif est représenté en vert, le matériel de maturité intermédiaire l'est en bleu et le matériel tardif l'est en rouge.

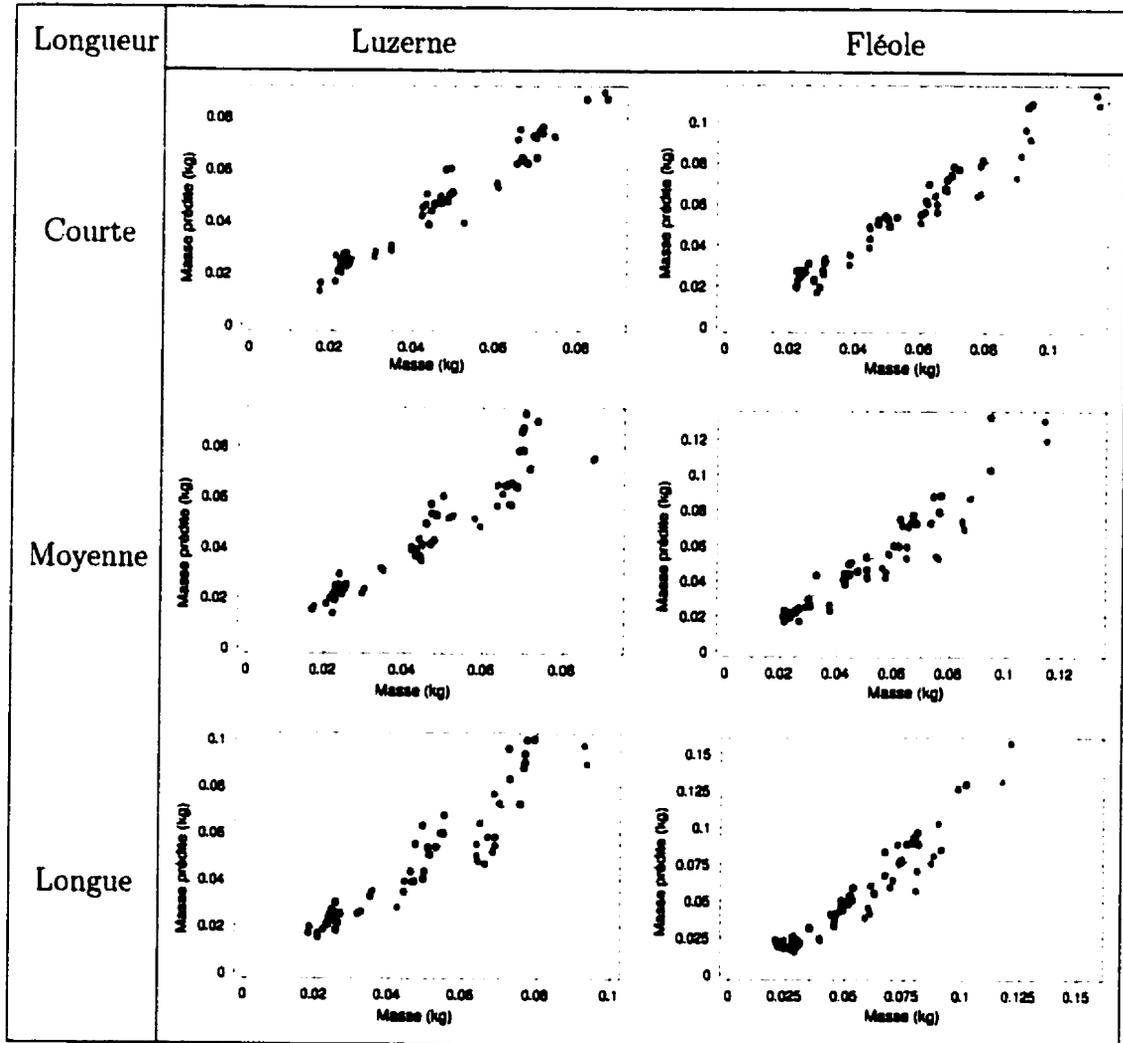


Figure C.2 : Prédiction de la quantité de matériel (équation 3.6) vs la masse expérimentale lorsque la fréquence d'oscillation et la teneur en eau sont connues.

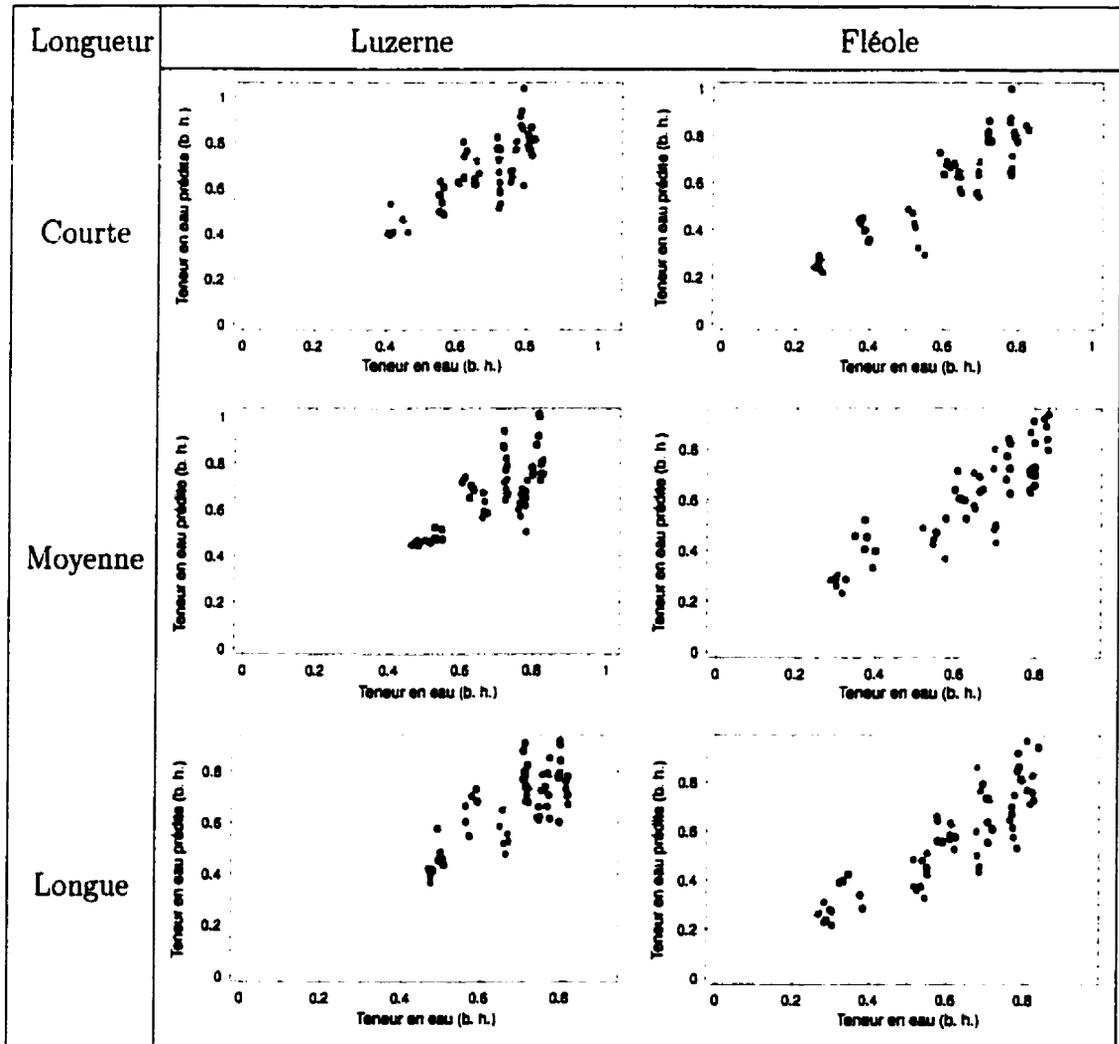


Figure C.3 : Prédiction de la teneur en eau (équation 3.7) vs la teneur en eau expérimentale lorsque la fréquence d'oscillation et la masse sèche du matériel sont connues.

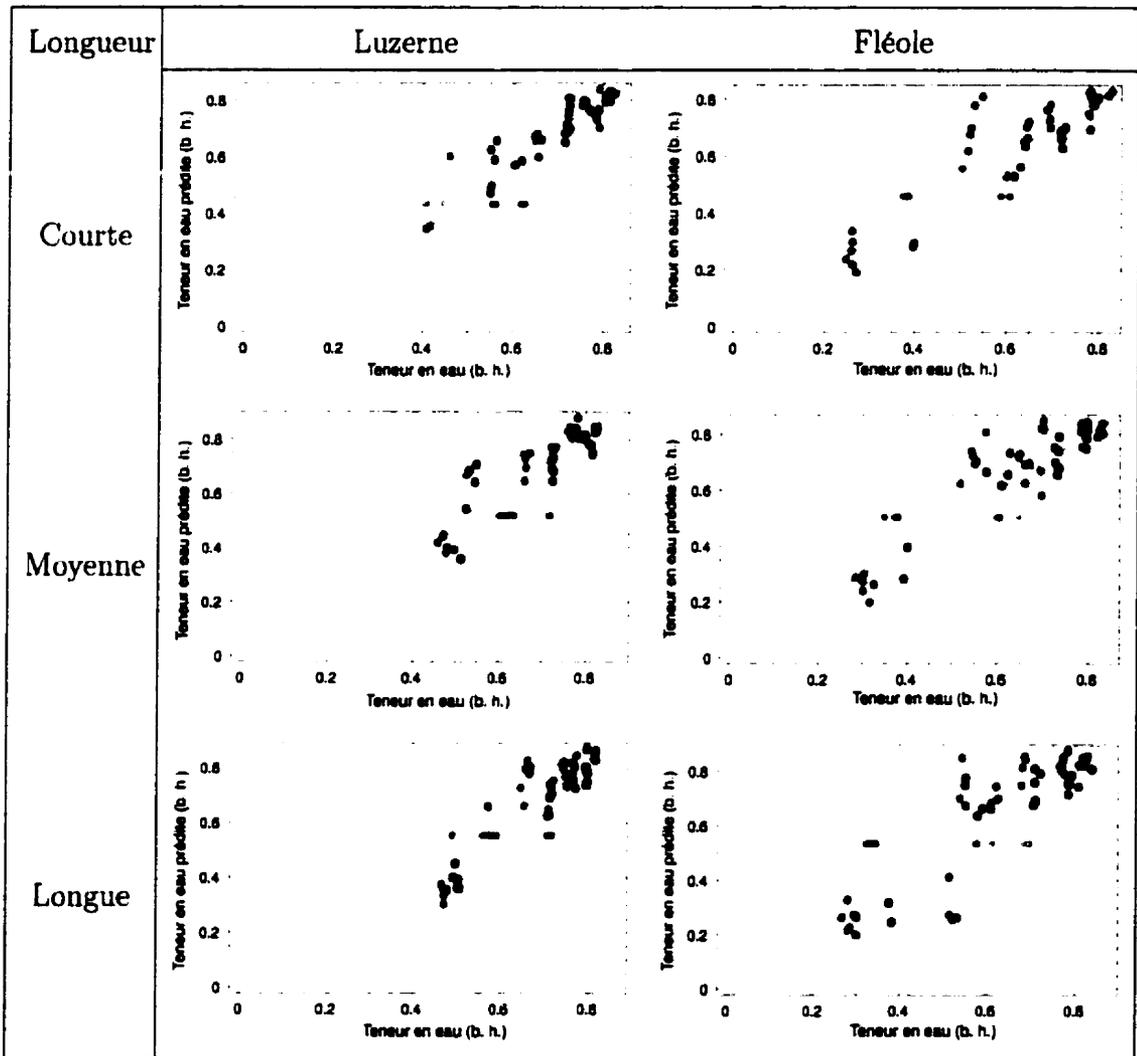


Figure C.4 : Prédiction de la teneur en eau (équation 3.8) vs la teneur en eau expérimentale lorsque la fréquence d'oscillation et la masse humide du matériel sont connues.