



Évaluation d'un outil robotique pour le désherbage et le suivi des cultures bio-intensives

Lisa Garlanda

► To cite this version:

Lisa Garlanda. Évaluation d'un outil robotique pour le désherbage et le suivi des cultures bio-intensives. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-01651065

HAL Id: dumas-01651065

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01651065>

Submitted on 28 Nov 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mémoire

Présenté par Lisa Garlanda

Dans le cadre de la **dominante d'approfondissement :**
IE2V (Ingénierie des espaces végétalisés en ville)

Évaluation d'un outil robotique pour le désherbage et le suivi des cultures bio-intensives

Pour l'obtention du
DIPLOME D'INGÉNIEUR HORTICOLE D'AGROCAMPUS OUEST, site d'ANGERS



Stage effectué du 06/03/2017 au 31/08/2017

À :

Sony Computer Science Laboratories,

6 rue Amyot,

75 005 Paris

Enseignants référents :
Christine Aubry

Maître de stage :
Peter Hanappe

Soutenu le : 20/09/2017

Engagement de non plagiat

① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

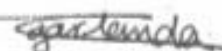
③ Sanction : En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

④ Engagement :

Je soussigné(e) LISA GARLANDA
Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Paris le 04/09/2017

Signature :



Remerciements

Je tiens à remercier mon maître de stage Peter Hanappe qui m'a suivi pendant tout le stage, qui a pris en compte mes remarques et avec qui j'ai eu des discussions passionnantes autour du thème de l'agriculture urbaine et du développement durable de demain. Je remercie aussi David Coliaux, également chercheur à Sony CSL qui travaille avec M. Hanappe sur l'élaboration du robot LettuceThink pour avoir toujours pris en compte mes remarques et qui m'a beaucoup aidé dans le traitement des données et dans l'organisation de mes idées. Au sein du laboratoire Sony CSL, je souhaite aussi remercier les stagiaires Ariane Courcier et Aurèle Macé, qui m'ont aidé, que ce soit dans l'installation de la zone d'expérimentation ou dans les entretiens avec les maraîchers.

Je souhaite aussi remercier grandement les personnes de l'association Veni Verdi : Simon Ronceray, Nadine Lahoud qui nous ont accueilli au collège Pierre Mendès-France pour que nous puissions faire nos expériences au sein de Paris. Un grand merci tout particulier à Simon pour avoir répondu à toutes mes questions et m'avoir toujours donné d'excellents conseils. Merci à Lorine Dargazanli, Camille Barkala et Anaïs Finnenberg, stagiaires et services civiques au collège pour leurs conseils et toutes nos discussions. Merci également à tous les collégiens qui se sont intéressés au projet LettuceThink pour leur curiosité, leurs questions et les discussions qui en découlaient.

Je remercie également tous les agriculteurs qui ont pris le temps de répondre à mes questions : Nicolas Beaufils, Clément Bénil, Laurent Cnudde, Olivier Halluin, Lucie Humbaire, Erwan Humbert, Romain Luchard, Laurent Chatelain et Shizu Okada. Merci à eux de m'avoir accueilli sur leur exploitation et de m'avoir consacré du temps. Leurs participations m'ont été d'une grande aide.

Merci également à tous les collaborateurs du laboratoire Sony CSL.

Je ne peux finir sans dire merci à ma tutrice de stage Christine Aubry qui a toujours été là pour répondre à mes questions et à mes inquiétudes et qui m'a guidée dans la création de ce mémoire. Merci également à mon professeur référent d'Agrocampus Ouest, monsieur Emmanuel Geoffriau.

Et enfin merci à toutes les personnes ressources que j'ai contacté pour avoir des informations nécessaires et les contacts des maraîchers que j'ai rencontrés.

Glossaire

AB : Agriculture Biologique

AMAP : association pour le maintien d'une agriculture paysanne

CNC : Computer Numerical Control

CSL : Computer Science Laboratory

FIBL : Institut de Recherche de l'Agriculture Biologique en Suisse

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ITAB : Institut Technique de l'Agriculture Biologique

GAB : Groupement d'Agriculteurs Biologique

GPS : Global Positioning System

OGM : Organisme Génétiquement Modifié

SAU : Surface Agricole Utile

Table des matières

Introduction.....	1
I) Contexte de l'étude.....	3
A) La robotique et les nouvelles technologies dans le monde agricole.....	3
B) Problématiques de la gestion des adventices dans le maraîchage biologique.....	7
C) Présentation du robot Lettucethink	12
II) Étude de l'efficacité du robot désherbeur LettuceThink	16
A) Contexte de mise en place des expériences	16
B) Expérience portant sur la fréquence minimale de passage permettant le maintien de la population d'adventices sous une valeur seuil	21
C) Expérience testant l'influence du robot sur la germination des adventices	24
D) Expérience testant la capacité du robot à désherber tout type d'adventice.....	27
E) Discussion générale sur les expériences.....	29
F) Améliorations qui ont découlé des observations terrains	30
III) État des lieux des pratiques concernant la gestion des adventices chez des maraîchers du Nord de la France et de leur vision de la robotisation de leur métier.....	33
A) Présentation du questionnaire soumis aux maraîchers rencontrés	33
B) Présentation et analyse des résultats des entretiens.....	34
C) Conclusion des entretiens	40
IV) Pistes d'amélioration du robot suite aux expériences et aux discussions avec les maraîchers .	42
A) Liens entre expériences sur le terrain et discussion avec les maraîchers.....	42
B) Définition d'une nouvelle catégorie de maraîcher cible pour le robot suite aux conclusions du questionnaire	43
Conclusion générale	45

Introduction

Sony Computer Science Laboratories (CSL) est un laboratoire de recherche fondamentale créé en 1996 à Paris. Cette entité est une succursale de Sony France, rattachée à Sony Europe, société du groupe Sony Corporation. Il offre un cadre idéal aux chercheurs pour qu'ils puissent développer leur projet en rapport avec l'informatique et la robotique dans les meilleures conditions possibles. Les résultats de la recherche au sein du laboratoire sont la propriété de Sony. Les sujets de recherche dans le laboratoire sont variés : une équipe langage étudie l'évolution et l'adaptation du langage grâce à des agents artificiels, une autre équipe travaille sur la composition de musique grâce à l'apprentissage machine (machine learning). Enfin la dernière équipe dans laquelle j'ai fait mon stage de fin d'études a pour thème de recherche principal le développement durable. Elle étudie plus précisément l'aide potentielle que la technologie peut apporter à la construction d'une société durable. Peter Hanappe est le fondateur de cette équipe. Il a été rejoint il y a un an par David Coliaux et ensemble ils travaillent plus spécifiquement sur la robotique dans l'agriculture et le maraîchage biologique. Ces deux docteurs cherchent à utiliser la technologie pour créer une agriculture durable qui réduit son impact sur l'environnement tout en fournissant une qualité de vie aux agriculteurs et des produits sains aux consommateurs.

Cette équipe travaille aujourd'hui sur le projet P2P Food Lab, combinaison de l'agroécologie et technologie, qui est un projet se basant sur la collaboration entre chercheurs et volontaires sur le thème de la production et la distribution de nourriture à l'échelle locale.

Les trois piliers de la démarche du projet P2P Food Lab sont :

- **l'agroécologie** ou l'art de l'agriculture durable qui promeut les méthodes de production visant à réduire l'impact de l'Homme sur son environnement tout utilisant les fonctionnalités offertes par son écosystème. L'agroécologie valorise les possibilités économiques, sociales et écologiques d'un milieu.
- **les communs** : notion qui dit que les ressources (physiques et intellectuelles) dont dépend une communauté doivent pouvoir être gérées directement par cette communauté.
- **la technologie** : qui tente de répondre à cette question : comment la technologie peut-elle être profitable et utile à l'agroécologie ?

Plusieurs initiatives ont été conçues par l'équipe P2P FoodLab : CitizenSeeds, le StarterKit ou encore LettuceThink, robot désherbeur adapté à des exploitations maraîchères de petite taille cultivant en agriculture biologique.

Le stage que j'ai effectué au sein de cette équipe s'intéressait particulièrement au robot LettuceThink. Le désherbage est un des points noirs de l'agriculture biologique : cette activité est très chronophage et cause des pertes de rendements importants. Ce robot a été créé pour être une alternative aux méthodes de désherbage actuelles. Il est capable de désherber des zones de cultures dans lesquelles les techniques se rattachant à la pratique de l'agroécologie, de l'agriculture bio-intensive, de la permaculture sont appliquées.

Le projet LettuceThink a un an, le premier prototype du robot a été créé pour des portes ouvertes au laboratoire Sony CSL fin 2016. Le fonctionnement du robot avait été testé uniquement dans des conditions idéales de laboratoire, M. Hanappe et Coliaux ont voulu évaluer son fonctionnement dans un environnement proche des conditions réelles d'utilisation du robot. C'est pourquoi ils ont monté une proposition de stage avec comme mission principale l'évaluation de l'efficacité du robot LettuceThink.

Au cours de ce stage, la mission principale qui m'a été confiée était de proposer une méthode d'évaluation de l'efficacité du robot LettuceThink pour permettre ensuite de l'améliorer pour le rendre plus efficace et adapté aux conditions réelles d'utilisation au sein des fermes en agriculture biologique. Au cours de échanges portant sur les améliorations possibles du robot, l'idée de consulter les professionnels susceptibles d'être intéressés par le robot est apparue. En effet, le robot a été imaginé par Peter Hanappe suite à une discussion avec un maraîcher professionnel, Nicolas Beauvils. Ce maraîcher lui a fait part des problèmes qu'il rencontrait pour désherber dans les rangs avec les outils actuels. Il nous fallait vérifier que ce problème était partagé par d'autres maraîchers. Une nouvelle

mission a donc vu le jour : récolter des informations auprès de professionnels du maraîchage concernant leurs pratiques de désherbage et la possible utilité du robot LettuceThink dans leurs exploitations. Ces données allaient nous permettre d'adapter le robot aux pratiques de gestions des adventices des professionnels et de faire concorder le fonctionnement de celui-ci aux besoins des agriculteurs.

Ce présent mémoire de stage cherche à répondre à une problématique : comment évaluer le travail du robot désherbeur LettuceThink et comment le rendre le mieux adapté possible aux besoins réels des professionnels du maraîchage ?

Dans un premier temps, une étude de la place de la robotique et des nouvelles technologies dans le mode agricole a été faite. Une étude des problèmes liés à la présence des adventices dans les exploitations agricoles et enfin une présentation du robot LettuceThink complètent la description du contexte du travail fait pendant le stage. Ce mémoire présente ensuite les expériences menées avec le robot avec protocoles expérimentaux, résultats et analyses, conclusions et critiques de ces expériences. Les entretiens menés avec les professionnels du maraîchage biologique constituent la troisième partie du mémoire, elle est formée de la trame des entretiens et les informations récoltées. Enfin les liens entre les résultats des expériences et des discussions avec les professionnels et toutes les pistes d'amélioration du robot qui ont découlé de ces deux travaux clôturent cette étude.

I) Contexte de l'étude

A) La robotique et les nouvelles technologies dans le monde agricole

D'un point de vue historique, il y a longtemps que l'agriculture mécanise nombre de ses pratiques. En effet, des gravures rupestres montrent l'utilisation de la charrue dès 2000 avant JC. De manière beaucoup plus récente, les outils permettant la récolte sont introduits vers le début de 19e siècle. La motorisation des outils agricoles arrive avec l'invention de la machine à vapeur et grâce à cette dernière, ces outils gagnent en vitesse et en efficacité. En 1831 est créé le premier "train de labourage à vapeur" utilisant en parallèle un moteur à vapeur (appelé locomobile) et de la traction animale. Cet outil laboure des champs grâce à une charrue qui était tirée le long d'un câble à travers la parcelle travaillée. Les vraies avancées techniques arriveront avec le moteur à pétrole à la fin du 19e siècle. Dès lors ces avancées ne font que progresser : en 1915 on laboure un hectare de champ en quatre heures avec un tracteur motorisé alors que dans le même temps il fallait 6 hommes et 20 chevaux. Au sortir de la Première Guerre Mondiale, les entreprises automobiles comme Renault ont transformé leurs chars d'assaut en tracteur. (Dellenbach, 2001)



Figure 1 : Un des premiers tracteurs viticoles imaginé par André Citroën dans les années 1920 (Source inconnue)

L'explosion du parc matériel agricole français a eu lieu dans les années 1950 : les exploitations agricoles étaient toutes en phases d'équipement et les progrès mécaniques à leur apogée. Cette explosion est causée par plusieurs événements :

- la France a besoin de se nourrir et les agriculteurs n'ayant plus d'animaux de traits (car réquisitionnés par l'armée) se tournent vers les tracteurs pour mettre en mouvement leurs outils,
- le plan Marshall : pour permettre à l'Europe de se relever et pour faire fonctionner l'industrie américaine, les Etats-Unis inondent le marché agricole français de leurs tracteurs,
- la Deuxième Guerre Mondiale a vidé les champs et la France est importatrice de nombreux produits de base tels que le blé. Les tracteurs sont donc rapidement utilisés dans les champs pour moderniser et mécaniser les campagnes françaises et assurer l'autonomie alimentaire du pays.

Cette autosuffisance alimentaire est aussi due au développement de la recherche dans le monde agricole et agroalimentaire. L'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) est créée en 1946 dans le but de palier à la faiblesse de l'agriculture française de l'époque. En développant les recherches dans la fertilisation et les sélections variétales, cet institut a pour mission d'améliorer les rendements du monde agricole. La France est auto-suffisante sur le plan alimentaire à la fin des années soixante (Bourgeois, 2007).

La mécanisation agricole a permis d'augmenter les surfaces de production cultivable par un agriculteur mais aussi les rendements des terres agricoles, de compenser la pénurie de main-d'œuvre et diminuer fortement la pénibilité de ce travail (Kienzle et Sims, 2006).

Selon les chiffres d'Agreste, depuis 1970 le nombre d'hectares cultivables par un travailleur (mesuré en équivalent temps plein) a été multiplié par trois : la mécanisation a offert la possibilité aux agriculteurs de cultiver plus de surface avec moins de main-d'œuvre et en augmentant leur rendement. À partir de 1980 le nombre de tracteurs en propriété commence à diminuer du fait de l'augmentation de la taille des exploitations (Dedieu et Lerbourg, 2016).

Les recherches autour des machines et tracteurs se déplaçant automatiquement dans le but d'augmenter la productivité des exploitations ont commencé dans les années 1960. (Wilson, 2000)

En 2013, 9 exploitants agricoles (tout type d'agriculture confondu) sur 10 possèdent un engin mécanisé et motorisé sur leur exploitation. Les agriculteurs spécialisés en grandes cultures et en élevage bovin possèdent généralement plus de tracteurs (en moyenne trois par exploitation) que les agriculteurs en maraîchage, horticulture et viticulture, qui possèdent en moyenne un tracteur par exploitation. Les exploitations de grandes surfaces possèdent plus de matériel agricole spécialisé dans une activité que dans les petites exploitations où le tracteur devra effectuer des tâches diverses (Dedieu et Lerbourg, 2016).

En grandes cultures toutes les activités de production sont réalisées à l'aide de matériel motorisé, que ce soit le travail du sol, le semis, l'entretien des cultures, le désherbage (pulvérisateur) ou la récolte (moissonneuse-batteuse, ensileuse, récolteuse de betterave ou de pomme de terre).

Dans le maraîchage diversifié en agriculture biologique, la mécanisation des activités dépend de la taille de l'exploitation, de la capacité d'investissements et du type de production choisi par l'agriculteur. Les exploitations classiques de maraîchage diversifié ont toutes un engin motorisé pour aider à certaines activités comme le labour, la préparation des sols pour les cultures, le désherbage mécanique ou la récolte des cultures de plein champ (Dedieu et Lerbourg, 2016). En parallèle du machinisme agricole, les outils utilisés manuellement sont encore présents dans le maraîchage diversifié. En effet certaines tâches comme le désherbage inter-rang ou la création de mottes pour le semis sont faites par des outils mis en mouvement par la main de l'homme (Mazollier et al, 2015) (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2013). D'autres tâches restent manuelles : le désherbage au pied des plants, le semis pour repiquage, la récolte de petits fruits et légumes fragiles, etc. (Agrobio Basse-Normandie, 2015).

Les avancées technologiques qui se développent dans le monde agricole ne sont pas uniquement tournées vers le machinisme. Les nouvelles technologies utilisées dans l'agriculture de précision permettent de nombreuses avancées dans la gestion des parcelles agricoles en fonction de leur variabilité. L'agriculture de précision est utilisée pour connaître l'hétérogénéité de la parcelle agricole en termes de besoin en nutriments, eau, etc. et d'y répondre de la manière la plus précise possible. Les agriculteurs peuvent ainsi limiter les intrants et les charges opérationnelles en optimisant les applications. C'est dans les années 1990 que sont nées les premières modulations d'amendements de parcelles en fonction de leurs caractéristiques spécifiques. (Zwaenepoel et Le Bars, 1997)

L'accès pour les agriculteurs à l'informatique et l'électronique mais aussi aux systèmes de localisation extrêmement précis (GPS) offrent à ces derniers les outils pour connaître de manière précise la variabilité et l'hétérogénéité réelle de leurs parcelles agricoles. Ces mesures sont réalisées grâce à des capteurs présents au sein de celles-ci. Cette variabilité concerne surtout les sols et les besoins des cultures en amendement et irrigation. Ces données sont mesurées grâce à des capteurs qui mesurent les propriétés du sol, des photographies aériennes, des capteurs de longueurs d'ondes émises par le couvert végétal ou encore grâce à des radars qui donnent des informations sur la structure de sol des parcelles. Les agriculteurs peuvent faire des interventions ciblées et adaptées.

L'agriculture de précision fournit aux agriculteurs la possibilité de faire des économies sur les intrants introduits dans les champs et d'avoir une approche culturale plus respectueuse de l'environnement. Les traitements ne sont faits que si nécessaire. Des études ont montré que l'application d'azote gérée par des capteurs fait économiser 31% de la quantité d'azote introduite dans les champs (Tremblay et al,

2011). D'autres études ont montré que l'utilisation de l'agriculture de précision réduit la consommation d'essence (Gonzalez-de-Soto et al, 2015).

La recherche tend à montrer que, grâce aux analyses de photographies des parcelles, les agriculteurs pourront bientôt faire du désherbage de précision en utilisant les techniques suivantes : les périodes et le pourcentage de levée des adventices peuvent être calculés, la localisation et le nombre de plants d'adventices peuvent être déterminés, ce qui permettra ainsi une application d'herbicide très précise.

L'agriculture de précision n'est pour l'instant utilisée que dans les grandes cultures et dans quelques vergers. Nous pouvons émettre plusieurs hypothèses qui peuvent expliquer l'absence de l'agriculture de précision dans le maraîchage diversifié :

- les exploitations de maraîchage diversifié n'ont pas les finances pour s'offrir les outils technologiques,
- les surfaces cultivées sont trop petites pour être traitées avec les outils actuels,
- la diversité des cultures dans ce type de maraîchage est importante et les outils actuels ne sont pas encore assez performants pour être adaptés à cette diversité et proposer des solutions adaptées.

Il existe une importante différence entre le parc matériel existant pour les grandes cultures en agriculture conventionnelle et le maraîchage diversifié en agriculture biologique. Il suffit de comparer les machines proposées par les équipementiers agricoles pour ces deux types d'agricultures pour s'en rendre compte. Le parc mécanisé des grandes cultures est beaucoup plus varié que celui proposé pour le maraîchage diversifié. De même, dans le domaine des nouvelles technologies, la recherche est surtout tournée vers les grandes cultures.

La robotique à proprement parlé est compliquée à développer dans le monde agricole. Les robots sont confrontés à des conditions environnementales et des produits à manipuler extrêmement différents et variables. Ils doivent pouvoir s'adapter à toutes ces conditions tout en faisant un travail de même qualité ou de qualité supérieure à ce qui est fait avec les méthodes actuelles (Béchar et Vigneault, 2016). Les principaux freins au développement de la robotique dans l'agriculture sont : le coût des robots, l'incapacité de ces derniers à s'adapter aux légers changements environnementaux et leur fragilité (Vidoni et al, 2015). L'utilisation des robots dans le domaine agricole se développera quand ces robots permettront à l'agriculteur de faire des économies, surtout sur la main-d'œuvre, qu'ils augmenteront la qualité du produit récolté, qu'ils seront des outils d'aide à la décision performants pour l'agriculteur, etc. Mais avant cela, il est inutile pour les agriculteurs d'acheter des outils robotisés moins efficaces que les techniques utilisées actuellement (Béchar, 2016). Malgré toutes ces contraintes, des robots agricoles commencent à être commercialisés dans certains domaines comme des robots à utiliser pour la traite des vaches ou des tracteurs autonomes. La recherche globale tend à créer des robots semi-autonomes, dans lesquels l'intervention humaine est indispensable pour leur fonctionnement, qui apporteront une aide importante aux agriculteurs (Béchar et Vigneault, 2016).

Il existe des robots agricoles tournés vers le maraîchage mais très peu sont déjà commercialisés. La société française Naïo Technologies crée et commercialise des robots qui désherbent et binent dans les vignes et les cultures maraîchères (Naïo Technologies, 2017). La société Farmbot (États-Unis) a créé un robot pour des particuliers qui est capable de gérer de manière autonome une petite parcelle de culture maraîchère (Farmbot, 2017). Ces deux robots sont intéressants pour le projet car les robots de Naïo Technologies visent le même type de production agricole et le robot développé par Farmbot fonctionne avec la même structure que le robot LettuceThink. Il existe un autre robot assez similaire à celui développé dans le laboratoire Sony CSL, conçu par l'entreprise suisse ecoRobotix, qui va être commercialisé en 2018. Ce robot désherbeur fonctionne également grâce à la détection des adventices et a une structure légère qui enjambe les cultures. Contrairement au robot LettuceThink, il désherbe chimiquement en pulvérisant les herbicides uniquement sur les adventices alors que LettuceThink désherbe mécaniquement (ecoRobotix, 2017). Cette liste de robots déjà ou bientôt commercialisés n'est pas exhaustive.

Quelques autres robots agricoles sont développés au sein d'universités comme le robot Digital Farmhand conçu au sein de l'ACFR (Australian Center for Field Robotics), laboratoire de recherche

robotique affilié à l'université de Sidney ou le robot Thorvald développé par la Norwegian University of Life Science.



Figure 2 : Le robot Oz de Naïo Technologies (haut, gauche, Source : Naïo Technologies). Le robot Farmbot (haut, droite, Source Farmbot). Thorvald de la Norwegian University of Life Science (bas, gauche, Source : NULS). Le Digital Farmhand de l'Australian Center of Field Robotics (bas, droite, Source : ACFR).

Le sujet de la robotique, dans le monde agricole mais aussi dans le monde industriel entraîne souvent des discussions passionnées. Certains acteurs du monde agricole ne voient pas d'un bon œil le développement des outils robotisés dans les champs. Les arguments qui reviennent le plus souvent sont le fait que les robots vont finir par remplacer les humains et que coûtants toujours plus chers que des machines, les agriculteurs, salariés et saisonniers du monde agricole vont perdre leur travail, remplacés par des robots. D'autres avancent la déshumanisation du métier d'agriculteur comme argument : en utilisant des robots, l'agriculteur perd le contact qu'il avait avec la nature et son environnement. Cette distance diminuerait les intuitions et les réflexes acquis sur le terrain. La souveraineté technologique pose aussi problème, les groupements d'agriculteurs qui travaillent sur des outils agricoles et qui publient le produit de leur recherche comme l'Atelier Paysan estiment que les choix techniques doivent être pris par les agriculteurs eux-mêmes et non par les entreprises privées d'équipement agricole (L'Atelier Paysan, 2017) (INPACT, 2016).

Ces arguments peuvent être discutés :

- aucune étude n'a montré formellement que la robotisation d'une partie du métier de maraîcher est responsable de la diminution de son travail. La robotique peut au contraire créer des emplois dans un nouveau domaine,
- les chiffres d'Agreste montrent que le maraîchage est un métier délaissé par les nouveaux agriculteurs car jugé trop difficile, trop contraignant. Le nombre d'exploitations de moins d'un à cinq hectares a reculé d'environ un tiers entre 2000 et 2010 (Agreste, 2013). La population maraîchère vieillit d'année en année, les exploitations maraîchères disparaissent. Les robots peuvent diminuer la pénibilité de certaines tâches et donc rendre ce métier plus attractif aux yeux des nouveaux agriculteurs.

Nous n'allons pas ici essayer de trouver une solution et une réponse satisfaisante entre les pro et anti robotisation mais nous mettons en avant que ce sujet est matière à débat dans le monde agricole et que nous y avons été confrontés.

Même si certains agriculteurs ne veulent pas d'outils robotisés dans leurs exploitations, certains s'intéressent à la question. Du fait des petites surfaces, des faibles investissements possibles de la part des maraîchers et de la diversité de cultures qui compliquent la création d'outils adaptés aux pratiques, le maraîchage biologique diversifié pâtit du manque d'outils mécanisés adaptés à ses techniques culturales et de cette différence d'investissements de la part des fournisseurs du machinisme agricole. Certaines tâches, comme le désherbage sont des activités très chronophages, pénibles et pourraient être faites par des outils motorisés de manière efficace.

B) Problématiques de la gestion des adventices dans le maraîchage biologique

Le maraîchage est, d'après la définition donnée par le dictionnaire Larousse, la culture intensive de légumes en plein air ou sous abris. Il est commun de séparer le maraîchage en deux catégories distinctes :

- le maraîchage périurbain ou polyvalent qui correspond à une production légumière très diversifiée sur petite surface destinée le plus souvent à la vente en circuits courts,
- le maraîchage de bassin ou spécialisé dans lequel la diversité de production est plus restreinte et destinée à la commercialisation en circuits longs.

Il existe un troisième type de production de légumes qui est le système légumier de plein champ mais sa structure ne correspond pas aux exploitations visées par le robot LettuceThink. (Gauche et al, 2011)

L'agriculture biologique, selon le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation est un mode de production qui trouve son originalité dans le recours à des pratiques culturales et d'élevage soucieuses du respect des équilibres naturels. Ainsi, elle exclut l'usage des produits chimiques de synthèse, des OGM et limite l'emploi d'intrants (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017). Le mode de production biologique possède sa propre réglementation à l'échelle européenne dictée dans le règlement européen n° 834/2007 (Journal officiel de l'UE, 2007).

Dans ce mémoire, nous nous intéressons spécifiquement aux exploitations de maraîchage diversifié cultivant en agriculture biologique. En effet c'est ce type d'agriculture qui est visé par le robot LettuceThink. Il est adapté aux pratiques culturales appliquées dans ces exploitations.

Du fait de l'interdiction d'utiliser des produits de synthèse comme des herbicides pour aider à la gestion des adventices, les exploitations maraîchères qui possèdent la certification AB (Agriculture Biologique) doivent utiliser des techniques non chimiques pour gérer les adventices dans leurs champs.

Il existe aussi de nombreuses exploitations maraîchères qui ne possèdent pas la certification AB mais qui n'utilisent pas d'intrants chimiques dans leur exploitation par conviction personnelle. Cette non-utilisation de produits phytosanitaires vient d'une volonté de diminuer l'impact sur l'environnement de l'exploitation agricole et de fournir des produits sains et de qualité aux consommateurs.

Il existe un renouvellement des formes d'exploitations agricoles créé par des mouvements paysans voulant montrer que d'autres systèmes que l'agriculture industrielle intensive mise en place au sortir de la Deuxième Guerre Mondiale sont possibles. Ces formes nouvelles prônent un changement de vision globale dans la manière de produire et proposent des alternatives n'exploitant de manière intensive ni l'homme ni la terre. Elles puisent leurs pratiques dans différentes sources d'inspirations et de philosophies, comme la permaculture, l'agriculture bio-intensive et l'agriculture naturelle (Morel, 2016).

Les microfermes et les initiatives d'agriculture urbaine se développant au sein des villes présentées dans la thèse de Kevin Morel et dans les travaux d'Anne-Cécile Daniel appliquent nombres de ces principes et sont ainsi sujettes aux problèmes causés par les adventices car elles n'utilisent pas de produits phytosanitaires pour faciliter leur gestion.

Il existe plusieurs définitions aux adventices, l'une botanique, définit les adventices comme des espèces végétales étrangères à la flore indigène d'un territoire dans lequel elle est accidentellement

introduite et peut s'installer, l'autre provenant de la malherbologie les définissent comme des plantes herbacées ou ligneuses indésirables à l'endroit où elles se trouvent. (AFPP- CEB 2011)

La présence de ces plantes n'est pas souhaitée au sein des parcelles cultivées. En effet elles sont responsables de nuisances qui peuvent avoir comme conséquences une perte importante de rendement sur la culture principale et une diminution de la qualité et de l'état sanitaire de la production. Elles peuvent être hôtes de divers parasites (insectes ou microorganismes nuisibles pour la culture). Chaque espèce d'adventice a une nuisibilité spécifique en lien avec ses caractéristiques propres (Figure 3).

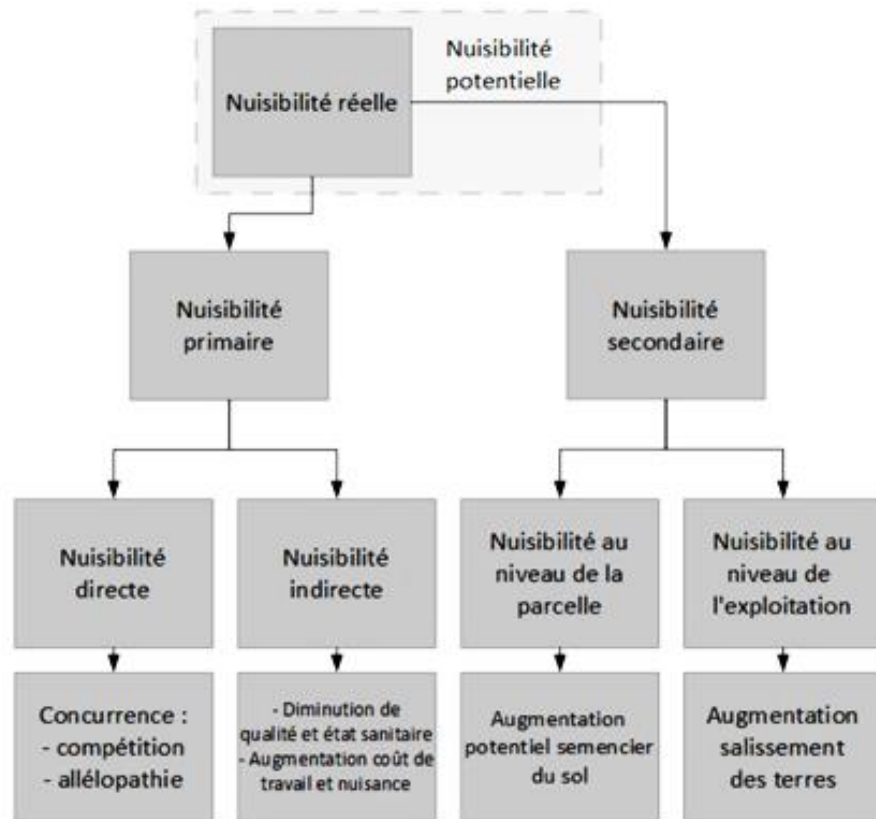


Figure 3 : Les différents types de nuisibilité des adventices et leurs conséquences (d'après Caussanel, 1989)

La principale nuisance des adventices est la concurrence : ces plantes vont se développer sur la parcelle en même temps que la culture principale et vont entrer en compétition avec elles sous deux formes :

- la compétition pour les nutriments présents dans le sol, l'espace pour se développer, la lumière nécessaire à la photosynthèse,
- l'allélopathie, qui regroupe l'ensemble des interactions biochimiques entre des plantes. Ces interactions peuvent être positives (stimulation de la croissance, prévention des attaques d'un parasite) comme négative (libération de composées biochimiques agissant comme des poisons ou des inhibiteurs de croissance sur les plantes voisines). (Valantin-Morison et al, 2008)

Les pertes de rendements estimées dues à la présence d'adventices dans tous les types de cultures confondus sont de plus de 30%. (Oerke, 2004)

Ces plantes sont définies comme nuisibles aussi à cause de leurs propriétés biologiques qui leur permet de coloniser de manière rapide et efficace de grands espaces. Ici est présentée la biologie commune des adventices présentes dans le Nord de France (ces traits caractéristiques sont communs à toutes les adventices).

Ces plantes sont pour la plupart généralistes : elles colonisent et s'adaptent très bien aux nouveaux milieux même si ceux-ci ont des caractéristiques différentes de leur habitat d'origine. Elles Il existe deux grands types d'adventices : les adventices annuelles et les adventices vivaces.

Les adventices annuelles qui ne vivent qu'une année et se reproduisent par graines, ces graines ont un taux de germination important, une germination et une croissance rapide.

Les vivaces vivent plusieurs années (même si leur feuillage disparaît), peuvent se reproduire de manière sexuée (grâce aux graines) mais aussi de manière asexuée : de nouvelles plantes se forment à partir d'organes végétatifs comme les racines (tubéreuses ou traçantes), des bulbes ou des tiges (Rodriguez et Gasquez, 2008).

Faire la liste exhaustive des adventices des régions du Nord de la France n'est pas le sujet principal de ce mémoire mais des guides concernant les adventices sont cités en bibliographie.

Il existe très peu de données recensées sur le temps passé par les agriculteurs à la gestion des adventices dans les exploitations maraîchères en agriculture biologique. Il faudrait pour cela installer un protocole très fastidieux au sein des fermes dans lesquels toutes les actions faites par les maraîchers et les salariés sont notées et chronométrées. Ces expériences ont été faites dans l'étude : « *Maraîchage biologique permaculturel et performance économique, Rapport d'étape n°2 : Juillet 2013* » dans la ferme du Bec-Hellouin mais même au sein de cette étude les actions liées au désherbage étaient comptabilisées dans les actions d'entretien de la parcelle étudiée. Elle ne précise pas les heures dédiées au désherbage (Guégan et Léger, 2013).

L'interdiction d'utiliser des herbicides rend cette tâche compliquée et très chronophage. Quelques études ont montré que le contrôle des adventices est une des activités du maraîchage les plus gourmandes en main-d'œuvre et donc en temps. Même en grandes cultures il est difficile de quantifier le temps passé à la gestion des adventices, en revanche on trouve quelques chiffres concernant la perte du rendement due à la présence d'adventices : les quelques témoignages d'agriculteurs qui cultivent en agriculture biologique font état de 40% de la récolte perdue dans les pires années à cause des adventices. Dans le cas du maraîchage, des organismes de conseil suggèrent parfois d'arrêter et de détruire la production plutôt que d'essayer de sauver une culture envahie par des adventices (Lichtenhan et al, 2002).

En ajout aux problèmes de pertes de rendements des récoltes, le désherbage soulève la question de la pénibilité du travail du maraîcher. Une étude menée lors du projet Compamed ZNA : « *Activité de désherbage, Étude des risques et de l'organisation du travail, Préconisations* » qui évalue de manière globale les méthodes de désherbage dans les ZNA (Zones Non Agricoles) s'est intéressée à la charge physique ressentie par des jardiniers professionnels chargés de l'entretien des espaces verts.

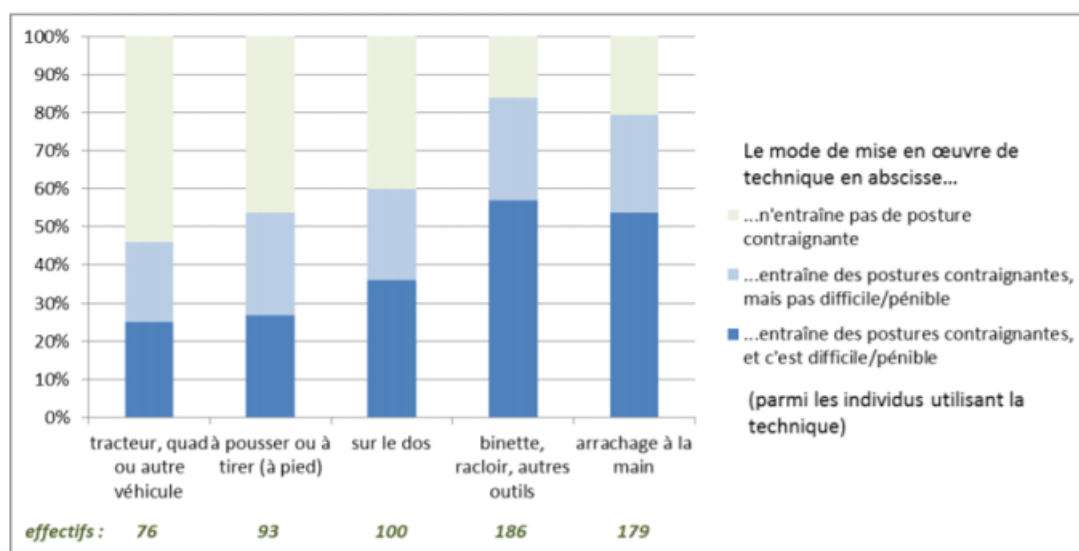


Figure 4 : Les modes de mise en œuvre causant des postures contraignantes, difficiles ou pénibles (Compamed, 2015)

Les résultats, présentés dans le graphique ci-dessus (Figure 4), montrent que le désherbage est une tâche pénible. Cette pénibilité décroît avec l'utilisation d'outils mais reste considérée comme entraînant l'adoption de postures contraignantes et finissant par causer des douleurs. Les douleurs engendrées par le désherbage dépendent également de la mise en œuvre de celui-ci. (Compamed, 2015)



Figure 5 : Nombre de réponses sur les douleurs associées au désherbage par technique et mode de mise en œuvre (Compamed, 2015)

Ce graphique (Figure 5) nous indique que le désherbage manuel, arrachage ou utilisation de la binette, est la méthode qui cause le plus de douleurs. Nous pouvons nous servir de ces résultats pour étayer notre propos car ces deux techniques sont utilisées dans le maraîchage professionnel en agriculture biologique.

Il existe de nombreuses méthodes utilisées en maraîchage biologique pour lutter contre l'envahissement des parcelles cultivées par les adventices. Elles peuvent se découper en deux grandes catégories : les mesures préventives et les mesures directes.

Les mesures préventives sont mises en place pour contrer l'apparition d'adventices sur la parcelle, elles sont basées sur la limitation maximale du réensemencement de la parcelle ou encore l'utilisation de techniques agronomiques pour gérer la germination des populations d'adventices. La gestion de la germination des graines peut être faite grâce à différentes méthodes :

- la couverture permanente du sol grâce à des cultures ou des couvertures inertes (inorganiques comme les bâches plastiques ou organique comme le paillage de déchets verts ou de paille) qui bloque l'accès à la lumière des adventices,
- les rotations de cultures qui entraînent la diversification des itinéraires techniques,
- le travail du sol (le labour permet l'enfouissement des graines et les place dans des conditions environnementales défavorables à leur germination),
- la technique de faux-semis (préparation du sol comme avant une mise en place de culture au cours de laquelle les adventices germent, ces adventices seront détruites après thermiquement ou mécaniquement),
- la gestion des apports externes comme l'irrigation ou la fertilisation.

Les mesures directes sont appliquées après la germination et le développement des adventices, elles consistent à gérer des plantes déjà germées.

Il en existe de plusieurs sortes (cette liste n'est pas exhaustive) :

- les méthodes thermiques comme le désherbage thermique réalisé avec des projections de vapeur d'eau bouillante ou des flammes
- les méthodes mécaniques dans lesquelles les adventices peuvent être arrachées, découpées, sectionnées ou enfouies.

Les méthodes mécaniques sont plus développées que les méthodes thermiques car plus faciles à mettre en place et moins chères. Ces méthodes peuvent être appliquées par des outils mécaniques motorisés

(outils, comme la herse-étrille ou la bineuse, traînés par un tracteur) ou non motorisés (bineuse manuelle). Ces outils peuvent être utilisés en inter-rangs, les passes-pieds, les abords des parcelles, etc. Les outils de désherbage les plus utilisés dans les exploitations maraîchères désherbent selon les méthodes suivantes :

- certains arrachent les adventices : ils déterrent complètement les plantes et fonctionnent avec des dents, comme la herse étrille
- certains coupent et sont munis de lame, comme les houes ou les sarcloirs,
- certains autres enterrent les adventices en les buttant.

Les méthodes de désherbage mécanique sont adaptées au stade de développement des adventices et les outils désherbent en alliant les différentes techniques présentées ci-dessus (EcophytoPIC, 2013) (Mazollier, 2015).

L'innovation dans le domaine des outils de désherbage légers adaptés aux petites exploitations maraîchères est en plein développement. La recherche dans ce domaine est autant menée par les agriculteurs eux-mêmes via de l'auto-construction que par des entreprises privées comme Terrateck ou La Fabriculture. L'auto-construction peut être développée par des maraîchers seuls ou par des collectifs d'agriculteurs comme l'Atelier Paysan. La mise en commun des connaissances des agriculteurs a pour but de développer des outils adaptés au maximum aux nouvelles pratiques des maraîchers, de réduire la pénibilité des tâches et de proposer des solutions respectueuses de l'environnement et de l'écosystème de l'exploitation. Ces outils sont des alternatives aux outils classiques proposés par les équipementiers agricoles et essaient de s'adapter aux besoins réels du monde du maraîchage. Lorsqu'on étudie les outils développés par les groupements d'agriculteurs et par les entreprises, on voit que les innovations sont foisonnantes.

Les outils créés sont parfois des inspirations d'outils existants mais mis de côté lors de la période de mécanisation intense de l'agriculture et qui attirent de nouveaux les maraîchers. D'autres peuvent être inventés à partir d'observations sur le terrain.

La dernière méthode de gestion directe des adventices est le désherbage manuel. Il est encore utilisé car certaines zones des parcelles, comme le pied des cultures reste encore difficilement atteignable par les outils, et fournit un travail de précision que les outils ne permettent pas encore (Lichtenhan, 2002) (Mazollier, 2015) (Vall, et al, 2003).

Comme indiqué plus haut ces techniques sont coûteuses en heures, en main-d'œuvre et, pour certaines comme le désherbage thermique, coûteuses en énergie. C'est dans l'optique de diminuer la charge de travail des maraîchers en agriculture biologique que le robot LettuceThink a été pensé : ce robot désherbeur est adapté aux pratiques culturales des exploitations maraîchères car il fait un désherbage mécanique.

C) Présentation du robot Lettucethink

Le robot LettuceThink a été créé en 2016 par Peter Hanappe suite à une discussion entre lui et le maraîcher Nicolas Beauvils, maraîcher fournissant l'AMAP dans laquelle monsieur Hanappe est adhérent, des problèmes qu'il rencontre sur la gestion des adventices sur son exploitation. Monsieur Beauvils lui explique la difficulté de désherber entre les plants lorsqu'il utilise les outils classiques de désherbage. En effet comme expliqué plus haut, les exploitations en agriculture biologique ne peuvent utiliser que des outils de désherbage fonctionnant de manière mécanique, manuelle et thermique sur les adventices.

Suite à cette discussion Peter Hanappe, ne venant pas du monde agricole et ne connaissant pas le fonctionnement des outils mécaniques classiques de désherbage se tourne vers le monde informatique pour chercher une solution à ce problème. Impliqué dans la culture « maker », il va commencer par chercher des solutions dans les outils qu'il utilise couramment comme la technologie, l'impression en trois dimensions, usage des CNC et la robotique. David Coliaux, qui arrive plus tard dans le projet, apporte avec lui des connaissances dans le traitement d'images et de visions par ordinateur. Le problème du désherbage entre les rangs va donc être abordé avec ces connaissances tournées vers le numérique et la robotique et va définir le fonctionnement du robot.

Le robot du projet LettuceThink émane de l'équipe P2P FoodLab du Sony Computer Science Laboratories et s'inscrit dans une réflexion plus large sur les systèmes alimentaires durables. Le robot, traitant le problème des adventices de manière mécanique pourra offrir une solution environnementalement respectueuse pour les agriculteurs et en adéquation avec les principes de l'agriculture biologique.

Les trois piliers de la démarche de Peter Hanappe et David Coliaux ont été présentés plus tôt dans le mémoire. Les voici appliqués au robot LettuceThink :

- **L'agroécologie** ou l'art de l'agriculture durable. Dans les fermes biologiques qui pratiquent un maraîchage diversifié, le désherbage est le plus souvent fait manuellement ou avec des outils mécanisés et motorisés simples. Le désherbage occupe jusqu'à plus de 25% du temps de travail du maraîcher, 23% des récoltes sont perdues à cause des adventices et la plupart des maraîchers souffrent de troubles musculosquelettiques (Compamed, 2015) (Huat et Touré, 2009). Le robot sera adapté aux fermes ayant des pratiques agroécologiques et faisant du maraîchage diversifié en polyculture qui utilisent des techniques culturales où les densités et les géométries de plantations sont variables.
- **Commun** : le design du robot est en Open Hardware et le code source est en logiciel libre. Cela signifie que le code source du traitement d'images est en accès libre sur Internet et que la licence du logiciel autorise la libre redistribution de ce code et la possibilité de création de travaux dérivés (The Open Source Définition, 2007). Les plans de la structure du robot sont également libres d'accès sur Internet. Les agriculteurs pourront monter leur propre robot grâce à ces données en libre accès mais pourront également trouver de l'aide pour la construction du robot au sein de formations organisées par les chercheurs, toutes les pièces du robot sont déjà présentes dans le commerce. Grâce à cette liberté, les maraîchers pourront adapter la structure du robot à leurs besoins. Les données récoltées resteront la propriété des agriculteurs qui décideront de leur utilisation.
- **La technologie** qui permet de développer des objets « intelligents », low-cost et « ouverts » à même d'assister les maraîchers dans leur exploitation. La technologie est ici inscrite dans la démarche de réflexion de savoir comment elle peut apporter son aide à ce corps de métier.

L'objectif final est de créer une communauté autour du robot. Cette communauté le développerait et l'améliorerait grâce aux contributions des ingénieurs, professionnels du monde agricole, chercheurs, citoyens, jardiniers, etc. Des discussions ouvertes autour de son fonctionnement et de pistes d'améliorations seraient mises en place avec toutes les personnes intéressées souhaitant participer au projet (Hanappe et Coliaux, 2017).



Figure 6 : Le premier prototype du robot LettuceThink au cours de portes ouvertes organisé par Sony CSL (Source : Peter Hanappe)

Le robot LettuceThink est un robot enjambeur : ses roues motrices passent dans les inter-rangs et le bras articulé est porté par la structure de manière à surplomber les zones de travail, c'est-à-dire les planches. La structure du robot a été pensée pour qu'il puisse travailler sur des planches qui font 80 centimètres de largeur (Figure 6).

Il est monté sur des roues qui lui donneront la possibilité de se déplacer le long des planches de cultures et dans l'exploitation.

La CNC (Computer Numerical Control, traduit en français par une machine-outil à commande numérique), structure noire, visible sur la photographie ci-dessus, au centre du robot, porte le bras articulé et le met en mouvement dans les trois directions X, Y et Z. Chaque mouvement le long de ces trois axes est déterminé par une commande numérique.

Une caméra prend des photographies des planches de cultures, les envoie au mini-ordinateur embarqué sur le robot qui va les traiter et les analyser selon les différentes longueurs d'ondes présentes. Le traitement de l'image permet de différencier les cultures principales du reste de la planche de culture en les discriminant grâce à leur longueur d'onde verte. Les zones de longueurs d'onde vertes sont catégorisées comme des zones contenant des cultures.

Le logiciel va ensuite déterminer un chemin qui fait passer le bras animé sur toute la planche sauf sur les zones qui contiennent les cultures (Figure 7).



Figure 7 : Passage défini par le logiciel après le traitement de la photographie de la planche de culture (Source : David Coliaux)

Le bras animé est muni à son extrémité d'un plateau circulaire portant trois dents qui tourne sur lui-même (Figure 88). Ce bras animé griffe le sol autour des zones protégées (c'est-à-dire des zones contenant du vert) sur une profondeur de 3cm et arrache les adventices.



Figure 8 : Plateau circulaire muni de trois doigts, ici des vis (Source Aurèle Macé)

Le robot doit être utilisé en prévention de l'installation des adventices. Si les adventices sont trop développées, l'algorithme va les détecter et les traiter comme des cultures. Il va les intégrer aux zones à ne pas désherber. Le travail du robot sur les planches de cultures s'apparente à du sarclage préventif : il agit en amont de l'implantation des adventices et empêche leur germination en travaillant le sol.

Ce robot a été conçu dans le but d'être adapté aux petites exploitations maraîchères avec peu ou pas d'employés, des petites surfaces (moins d'une dizaine d'hectares) et peu de fonds d'investissements importants utilisant des techniques de culture se rapportant à l'agroécologie (agriculture bio-intensive, permaculture, etc.).

Grâce à sa structure qui lui enjambe les cultures et à la CNC qui met en mouvement le bras désherbeur de manière précise sur la zone à désherber, le robot peut travailler sur des planches accueillant des cultures avec de fortes densités de plantation et sans une géométrie de plantation particulière. Comme il travaille sur du traitement d'images son utilisation n'est pas restreinte à un seul type de culture et peut s'adapter à des densités diverses au sein d'une même zone de travail. Les exploitations utilisant des techniques de cultures différentes de l'agriculture conventionnelle pourront elles aussi avoir des outils mécanisés et autonomes adaptés à leurs pratiques.

De plus, son logiciel de traitement numérique d'images, les plans de construction du robot, les références pour tous les composants et le matériel du robot sont en accès libre. Ces conditions de construction rendent son acquisition envisageable pour des exploitations ayant peu de fonds propres.

Ces deux points permettent donc de cibler les exploitations maraîchères présentées plus haut. Nous avons discriminé les exploitations en ne présentant que les exploitations en production biologique mais des exploitations en conventionnel ou en agriculture raisonnée peuvent aussi être intéressées. En effet ce robot est une alternative à l'utilisation des intrants phytosanitaires et utilisant des techniques de l'agriculture bio-intensive.

Il existe plusieurs versions du robot LettuceThink.

La première version est testée actuellement au collège Pierre Mendès France dans le 20^{ème} arrondissement de Paris (Figure 99).

Cette version a comme objectifs la preuve de concept et le début du développement des algorithmes de traitement des images et de prise de décision concernant le mouvement du bras. Nous essayons de rendre cette version la plus adaptée possible aux conditions d'utilisations réelles. Dans cette version, toute la structure, hors CNC, est en bois et le robot ne se déplace pas automatiquement. Les efforts de recherche se sont concentrés sur l'algorithme de traitement de l'image et sur le mouvement du bras animé grâce à la CNC et commandé par le logiciel. Au fur et à mesure des expériences mises en place (présentées plus tard dans le mémoire), la mécanique et le design ont aussi été étudiés dans le but d'améliorer la structure du robot et de la rendre plus adaptée aux conditions environnementales des exploitations maraîchères.



Figure 9 : Première version du robot LettuceThink au collège Pierre Mendès-France (Source : Peter Hanappe)

Dans la deuxième version (en cours de construction, Figure 1010) les trois améliorations majeures sont : le passage à ROS1 (Robot Operating System, langage informatique adapté aux robots), une navigation avec quatre roues motrices électriques indépendantes et une autonomie en énergie (installation d'un panneau solaire au-dessus de la structure).

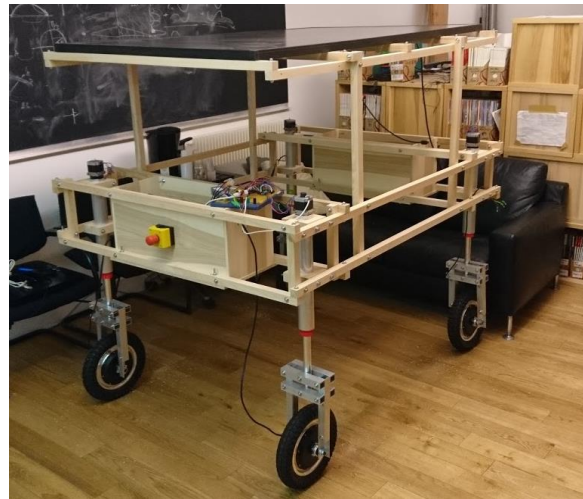


Figure 10 : Deuxième version du robot LettuceThink au laboratoire Sony CSL (Source : Lisa Garlanda)

Avant le lancement des expériences, le robot n'avait jamais été utilisé dans les conditions réelles d'utilisation, c'est-à-dire en extérieur, soumis à toutes les variations climatiques possibles.

Le fait de tester le robot dans les conditions réelles a entraîné de nombreuses adaptations et modifications nécessaires pour permettre au robot de fonctionner de manière efficace dans cet environnement différent des conditions idéales de laboratoire.

II) Étude de l'efficacité du robot désherbeur LettuceThink

A) Contexte de mise en place des expériences

Définition de l'efficacité et présentation des hypothèses testées

Le but des expériences menées tout au long de ce stage était de tester et d'évaluer l'efficacité du désherbage du robot LettuceThink.

Avant tout, il est nécessaire de donner la définition de l'efficacité sur laquelle nous nous sommes reposés pour monter les expérimentations suivantes. L'efficacité du robot est définie comme étant la capacité du robot à :

- travailler dans les conditions d'utilisations réelles, c'est-à-dire à l'extérieur, sur des planches de cultures classiques,
- gérer les différents types d'adventices présents dans les parcelles maraîchères,
- travailler sur différents types de cultures.

Dans cette définition le terme gestion des adventices signifie empêcher la germination des graines d'adventices présentes dans le sol et arracher les plants d'adventices déjà installés.

Pour pouvoir évaluer l'efficacité selon la définition donnée, il faut avoir une approche pluridisciplinaire :

- l'informatique permet le traitement numérique des images et la planification de chemin pris par le bras animé du robot,
- la mécanique touche au fonctionnement matériel du robot (navigation, ergonomie, structure matérielle, etc.),
- et l'agronomie traite de la biologie des adventices, de leurs interactions avec les plantes cultivées et de l'influence du robot sur le développement des plantes cultivées et des adventices.

En ce qui concerne les expériences menées, les hypothèses testées sont les suivantes :

- la fréquence minimale de passage du robot permettant de maintenir la quantité d'adventices présentes sur la parcelle sous une valeur seuil acceptable par l'agriculteur est de un passage par semaine,
- le passage du robot influence la germination des graines d'adventices en l'inhibant,
- le robot est capable de désherber tous les types d'adventices présents dans les exploitations maraîchères en agriculture biologique.

Nous cherchions à trouver une fréquence de passage minimale qui contrôle la population d'adventices et maintient la quantité d'adventices présentes sur une parcelle cultivée sous un seuil acceptable pour un agriculteur. La fréquence peut être modulée en fonction du niveau d'exigence du maraîcher concernant la qualité du désherbage et de la quantité d'adventices présentes acceptée. Il n'existe pas de données renseignant sur la fréquence de désherbage appliquée dans les exploitations maraîchères, nous avons donc choisi de prendre la fréquence d'une fois par semaine en nous basant sur les pratiques des jardiniers amateurs des jardins associatifs qui viennent s'occuper de leur parcelle une fois par semaine. Des expériences préliminaires, mises en place en avril et présentées dans la suite du mémoire, nous ont permis d'observer des différences de temps de germination des adventices si le robot passe ou non juste après le semis. Nous avons voulu tester cette influence de manière plus précise et nous avons monté un protocole expérimental essayant de mettre en avant cette influence observée.

Au vu du fonctionnement mécanique du robot, nous pouvons discriminer les adventices selon leur appareil racinaire. En effet, l'outil s'enfonce dans le sol et arrache les adventices. Les organes les gardent ancrées dans le sol sont leurs racines, nous avons donc voulu tester si le robot était capable de désherber des adventices avec de systèmes racinaires différents.

Pour valider ces trois hypothèses nous avons mis en place trois séries d'expériences qui seront présentées plus tard.

Les expériences ayant trait aux différents types de cultures sont liées à l'intelligence artificielle qui traite les images, cette partie est traitée par le chercheur David Coliaux. Dans ces analyses les différences des cultures sont définies par leur architecture et leur phénologie. Les expériences ont été faites en parallèle des expériences étudiant l'action mécanique permettant la gestion des adventices par le robot. La gestion des adventices par le robot est faite grâce à l'action mécanique du robot qui désherbe et grâce aux traitements d'images et à la planification par ordinateur du chemin pris par l'outil désherbeur.

Ces expériences avaient comme but principal d'étudier l'efficacité du traitement de l'image qui gère le désherbage d'une planche contenant des plantes cultivées et des adventices mais les contingences du réel nous ont contraint à restreindre le cadre expérimental. Grâce à ces expériences, nous avons pu récolter des données préliminaires sur le désherbage fait par le robot en présence de cultures et de créer des bases de données numériques pour le robot sur la croissance de plantes ayant des architectures variées (Coliaux et al, 2017).

Zone d'expérimentation choisie et description des conditions environnementales des expériences

La zone d'expérimentation choisie pour mener les expériences est un espace loué à l'association d'agriculture urbaine Veni Verdi dans le collège Pierre Mendès France situé dans le 20^e arrondissement de Paris. Le collège, étant localisé au sein de Paris, facilite les déplacements entre le laboratoire de recherche et la zone d'expérimentation.

L'association Veni Verdi est née en 2010 sous l'impulsion de Nadine Lahoud, sa fondatrice, qui voulait créer des jardins dans le but de partager et de transmettre sa passion pour le jardinage en accueillant les enfants dans des lieux végétalisés. Les espaces du collège Pierre Mendès-France ont été investis en 2014 et continuent d'être entretenus et animés par les salariés de l'association, des bénévoles et des collégiens qui sont complètement intégrés au projet (Veni Verdi, 2017) (Figure 1111).



Figure 11 : Zone du collège Mendès-France végétalisée par Veni Verdi appelée l'amphithéâtre (Source : Peter Hanappe)

L'espace d'expérimentation est découpé en trois zones : une zone dans laquelle les expérimentations sont menées en pleine terre et deux autres zones où les expérimentations sont menées hors sol (Figure 12).

Le substrat contrôlé permet de répéter les expériences en offrant un environnement répliquable. Ces expériences pourront être relancées dans des conditions similaires mais dans un lieu différent. Les résultats obtenus pourront être comparés.



Figure 12 : En premier plan de la photographie, la zone hors sol et au fond, la zone pleine terre (Source : Lisa Garlanda)

Le substrat contrôlé a une composition inspirée des substrats utilisés sur les toits d'AgroParisTech par l'équipe du projet T4P (Toits Parisiens Productifs Projet Pilote) (Grard et al, 2015). Il est composé d'une couche de compost de déchets verts, d'une couche de marc de café mycélisé (contenant du mycélium de pleurote) et d'une autre couche superficielle de compost de déchets verts. Les bacs sont isolés du sol grâce à une couche de carton posée dans le fond du bac en amont du dépôt du compost de déchets verts. Les fournisseurs des composants du substrat sont Bio Yvelines Services pour le compost et l'entreprise La boîte à champignons pour le marc de café mycélisé. Ce substrat en couches est installé dans des bacs de 40cm de hauteur est de dimensions 1,60 m sur 80 cm de largeur (Figure 12).

Les zones en pleine terre mesurent 80 cm sur 80 cm de large (ces dimensions correspondent à la largeur maximale que le robot peut enjambrer), soit 0,64 m² de surface.



Figure 13 : Bac contenant une première couche de marc de café mycélisé et couche supérieure de compost de déchets verts (Source : Lisa Garlanda)

Pour pouvoir caractériser l'environnement de manière précise, des capteurs Flower Power de la société Parrot ont été installés dans les bacs et dans les zones en pleine terre. Ils mesurent la température de l'air, l'humidité du sol et le niveau d'ensoleillement.

Matériel biologique choisi pour les expériences

Pour mener ces expériences nous devons créer un environnement qui se rapprochait le plus possible des conditions d'une exploitation maraîchère.

Nous avons donc choisi les cultures qui seraient désherbées par le robot mais aussi les adventices, ou du moins les plantes qui représentaient les adventices.

Les plantes potagères ont été choisies sur différents critères :

- la rapidité du cycle de vie : les plantes ayant un cycle de vie court ont permis de répéter les expériences plusieurs fois pendant la durée du stage,

- une architecture intéressante et représentative d'un nombre important d'autres espèces,
- une période de culture adaptée aux dates du stage.

La sélection finale a été : le radis, la laitue pommée d'été, l'oignon jeune rouge et la carotte. Ces végétaux ont été cultivés pour constituer des bases de données sur les différentes architectures végétales présentes dans les exploitations maraîchères.

Les plantes qui représentaient les adventices dans les expériences ont été choisies car elles ont les mêmes caractéristiques que les adventices présentes dans les exploitations maraîchères :

- un développement rapide et une certaine rusticité,
- la sélection comprenait des plantes annuelles et des plantes vivaces,
- certaines présentaient un système racinaire pivotant, d'autres un système racinaire fasciculé et enfin
- elles avaient une multiplication végétative et/ou sexuée.

Le choix final a été basé surtout sur la capacité de ces plantes à avoir une période de germination et de levée très courte et est le suivant : le ray-grass anglais *Lolium perenne* (monocotylédone vivace ayant un système racinaire fasciculé) (GNIS, 2015), la phacélie *Phacelia tanacetifolia* (dicotylédone annuelle ayant un système racinaire pivotant et le sarrasin *Fagopyrum esculentum* (dicotylédone annuelle ayant un système racinaire mixte (pivotant et fasciculé) (Minette, 2009). Avec ces adventices à germination rapide, nous plaçons le robot dans des conditions difficiles.

Ces plantes ont été utilisées dans les deux premières expériences.

Expériences menées en parallèle

Au début du stage, les expériences qui devaient être menées étaient différentes de celles présentées ici.

Un travail préliminaire de création de protocoles expérimentaux testant l'efficacité du désherbage du robot LettuceThink a été fait au cours d'un projet d'ingénieur réalisé par trois étudiantes de la dominante d'approfondissement IE2V (Ingénierie des Espaces Végétalisés en Ville) : Margot Michault, Muriel Poirier et moi-même. Ces protocoles ont été changés au début du stage car trop complexes et prenant en compte trop de paramètres différents.

Les nouvelles expériences imaginées au mois d'avril s'intéressaient aux critères suivants qui pouvaient faire varier la qualité du désherbage fait par le robot :

- la densité de plantation des plantes cultivées
- l'organisation spatiale des cultures
- la fréquence de passage du robot.

La première expérience qui a été lancée en mai était celle de la fréquence de passage : nous avons choisi 3 fréquences de passage différentes sur les zones où avaient été semées des adventices (ray-grass anglais, phacélie et sarrasin) et repiqués des radis.

C'est au cours de cette expérience que toutes les difficultés liées aux changements de conditions environnementales sont apparues pour la partie algorithmique du robot. Elle a néanmoins permis d'observer que le passage du robot ne semble pas influencer le développement des cultures et que le robot fait réellement diminuer la population d'adventices sur la parcelle. Ces résultats sont présentés dans la publication : « LettuceThink : An open and versatile robotic platform for weeding and crop monitoring on microfarms » de David Coliaux. Cette expérience doit être poursuivie et refaite car elle n'a été réalisée qu'une seule fois. On ne peut donc pas généraliser ces résultats obtenus mais ils offrent une idée des prochains résultats.

Nous avons prévu de lancer les expériences dans les zones en pleine terre et dans les bacs hors-sol. Le retard pris nous a forcé à changer les protocoles expérimentaux et toutes les expériences suivantes ont été faites en pleine terre, les bacs n'ont pas été utilisés pour les expériences présentées ci-dessous.

Peu de chiffres explicites présentent la perte de rendements liée à la présence d'adventices au sein des exploitations maraîchères. Nous avons décidé d'essayer de comparer le rendement d'une culture de carottes (car sensibles à la concurrence des adventices, voir discussion avec les maraîchers professionnels) de parcelles riches en adventices (introduites de manière artificielle) et de parcelles

n'ayant pas d'adventices. Cette expérience a été lancée fin juin dans les bacs hors-sols. Elle est encore en cours et nous verrons si nous pouvons utiliser les résultats récoltés pour étayer notre propos sur l'importance du désherbage dans les exploitations maraîchères.

Données mesurées au cours des expériences

Les mesures prises au cours des expériences ont été de deux genres :

- des données quantitatives sur le développement des adventices :
 - o suivi du nombre de graines d'adventices germées tout au long des expériences
 - o mesure des surfaces foliaires projetées sur les photographies des parcelles des adventices pour caractériser leur développement
- des données qualitatives sur la présence des adventices et leur développement sur toutes les expériences récoltées grâce à des photographies prises sur toutes les zones des expérimentations.

Les photographies ont ensuite été utilisées pour mesurer numériquement la présence de vert sur les images (correspondant à la surface foliaire des adventices projetée sur la photographie) et pour ainsi différencier le stade de développement des adventices dans les différentes zones. La surface foliaire donne une indication sur le stade de développement des adventices que le suivi numérique ne donne pas. Les images ont permis de calculer le pourcentage de recouvrement du sol par les feuilles des adventices : en discriminant les zones de couleur verte et les zones de couleur marron, la surface foliaire des adventices projetée sur les images peut être calculée. Nous utilisons le même calcul que celui qui a été utilisé pour mesurer l'indice de surface foliaire mais nous n'utilisons que la surface foliaire projetée visible sur les photographies et non la surface foliaire entière de la plante.

Toutes les expériences présentées ci-dessous ont été réalisées sans plantes cultivées, uniquement avec les adventices citées plus haut et toutes les expériences ont été faites en pleine terre.

Pour en revenir aux expériences mises en place, nous avons lancé trois séries d'expérimentations dans le but de valider nos hypothèses de départ.

B) Expérience portant sur la fréquence minimale de passage permettant le maintien de la population d'adventices sous une valeur seuil

Présentation de l'expérience

La première expérience portait sur la fréquence minimale de passage du robot à appliquer pour garder une population d'adventices sous une valeur seuil (qui pourra être par la suite déterminée par l'agriculteur) et les maintenir à un stade de développement dans lequel elles n'entrent pas en concurrence avec les cultures mises en place.

L'organisation de cette expérience était la suivante : trois zones de test de fréquence et une zone témoin sans passage de robot ont été créées : dans la première zone la fréquence de passage était de deux passages par semaine, dans la deuxième zone la fréquence était d'un passage par semaine et la dernière zone était d'un passage toutes les deux semaines, voir la Figure 14 ci-dessous. Dans les quatre zones a été semée la même quantité d'adventices (mélange cité ci-dessus : ray-grass anglais, phacélie et sarrasin). L'expérience courait sur un mois pendant lequel un suivi quantitatif et qualitatif du développement des adventices a été fait. Les adventices levées étaient comptées et toutes les zones étaient prises en photographie deux fois par semaine.

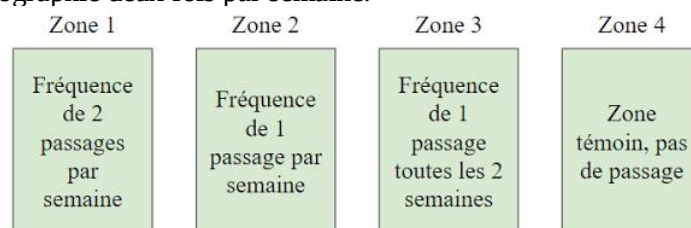
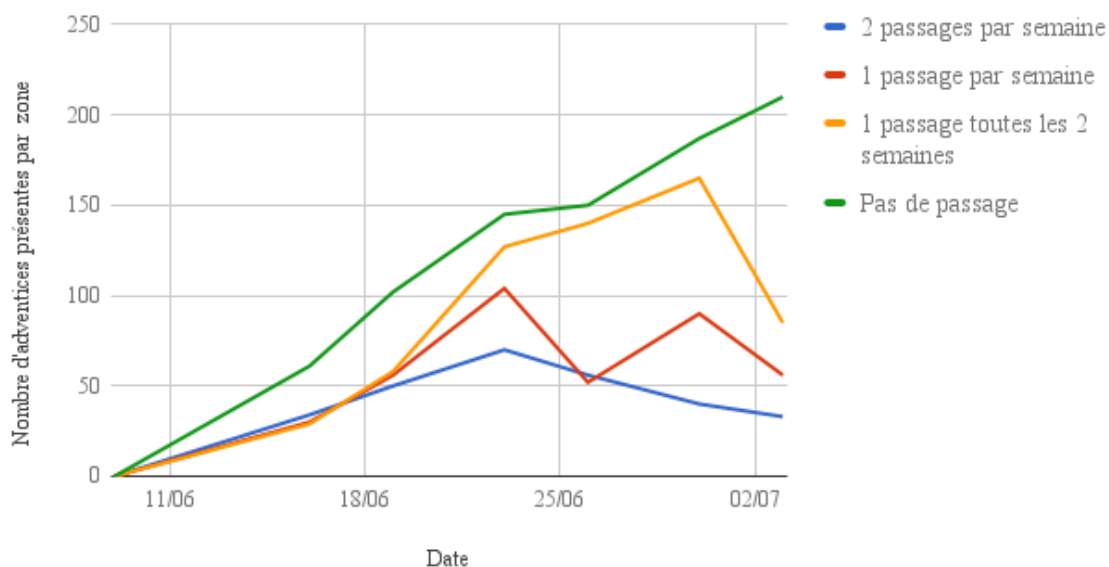


Figure 14 : Schéma de l'organisation spatiale de l'expérience sur la fréquence de passage

Résultats

Les résultats de l'expérience testant la fréquence optimale de passage du robot sont présentés sous forme de graphique, de photographies et de tableaux.

Influence de la fréquence de passage du robot sur le développement des adventices (mois de Juin)



Influence de la fréquence de passage du robot sur le développement des adventices (mois de Juillet)

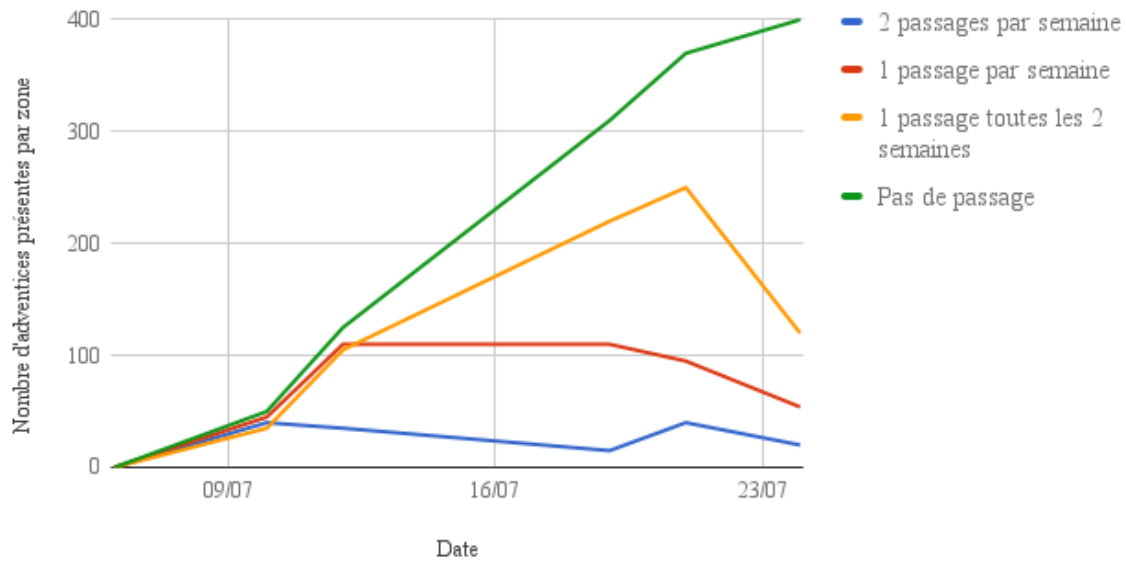


Figure 15 : Graphiques présentant l'influence de la fréquence de passage du robot sur le développement des adventices, expériences du mois de juin et juillet

Ces deux graphiques (Figure 155) présentent le nombre d'adventices présentes dans chaque zone tout au long de l'expérience en fonction du nombre de passage du robot. Dans les deux cas, la courbe bleue correspond au nombre d'adventices présentes dans la zone travaillée 2 fois par semaine, la courbe rouge à la fréquence de 1 fois par semaine, la courbe jaune 1 fois toutes les deux semaines et la courbe verte est la courbe témoin sans passage.

La différence de nombre de graines germées et présentes dans la zone témoin en Juin et Juillet s'explique par les différences de conditions météorologiques entre le mois de Juin et le mois de Juillet.

Dans les deux séries de l'expérience, nous pouvons voir que la fréquence de 2 passages par semaine permet de maintenir la population d'adventices entre environ 40 et 65 plants. Grâce à la fréquence de 1 fois par semaine la population d'adventices est maintenue entre 50 et 100 adventices et entre 100 et 250 avec la fréquence d'une fois toutes les deux semaines. Le robot ne passait que 3 jours après le semis des adventices car ce délai correspond à la période de germination des graines. Les résultats prennent en compte les données prises à partir de la quatrième journée après le semis.

Dans le cas de la fréquence de passage de 1 fois toutes les deux semaines la courbe représentative du nombre d'adventices est similaire dans les deux sessions de l'expérimentation. La courbe est croissante jusqu'au passage du robot, elle atteint un maximum de 165 adventices présentes dans la zone pour le mois de juin et de 250 adventices pour le mois de juillet.

Ces itérations montrent des résultats similaires en ce qui concerne les variations dans le nombre d'adventices présentes sur les zones de travail au cours des expériences.

Les photographies ont été prises en appui aux mesures de comptage humain : le nombre de graines germées ne donne aucune indication sur le développement des adventices dans la zone d'expérimentation ni sur la prolifération de ces adventices. Ces chiffres n'indiquent pas comment les adventices ont conquis l'espace disponible. La mesure de la surface foliaire projetée des adventices offre une bonne mesure de développement de ces adventices. De plus, l'indice de surface foliaire projetée est un bon indicateur sachant qu'une des compétitions qui existe entre les adventices et les cultures est la compétition pour la lumière du soleil. Ainsi sur les photographies nous pouvons voir le développement et le recouvrement des adventices.

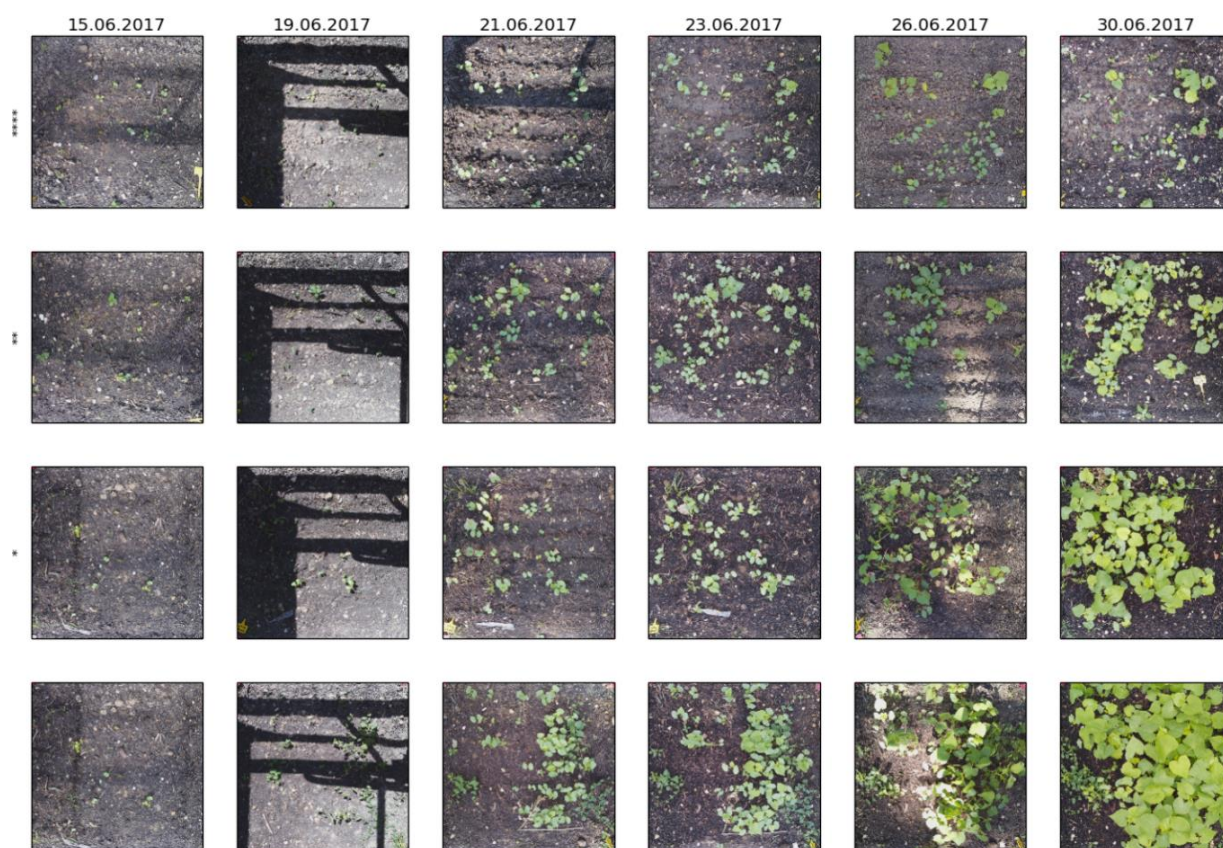


Figure 16 : Photographies des zones travaillées par le robot avec différentes fréquence, expérience de Juin. Chaque ligne de photographies correspond à une zone travaillée avec une fréquence différentes, allant de 2 passages par semaine (la première ligne) à absence de passage (la dernière ligne) (Source : David Coliaux)

Dans la Figure 16, la première ligne de photographies correspond à la zone où le robot est passé 2 fois par semaine, la zone présentée dans la deuxième ligne a été travaillée une fois par semaine, ainsi de suite. Les colonnes correspondent aux jours où les photographies ont été prises.

Comme on peut le voir sur les photographies, la première adventice à lever est le sarrasin, ces indices de surface foliaire projetée caractérisent surtout le développement de cette plante. Lorsque nous soulevons les feuilles de sarrasin, nous pouvons voir les plants de phacélie et de ray-grass, preuve que ces adventices s'installent aussi sur la parcelle, mais leur surface foliaire n'est pas calculée sur ces images. Le développement du ray-grass et de la phacélie a été pris en compte dans le comptage des adventices.

Tableau 1 : Indice de surface foliaire des adventices à la fin de l'expérience sur la fréquence (mois de Juin)

Indice de surface foliaire projetée des adventices à la fin de l'expérience (mois de Juin) (en %)	
Fréquence de passage : 2 fois par semaine	11,9
Fréquence de passage : 1 fois par semaine	36, 5
Fréquence de passage : 1 fois toutes les 2 semaines	61,7
Témoin : pas de passage	79,5

D'après les photographies et le tableau ci-dessus (Tableau 1) nous pouvons présenter le développement des adventices (surtout caractérisé par le sarrasin) en nous basant sur l'indice de surface foliaire projetée des adventices. Plus la fréquence de passage du robot est élevée plus cet indice est faible. À la fin de l'expérience l'indice de surface foliaire projetée maximal était de 61,7% dans la zone où le robot passait une fois toutes les deux semaines.

Le passage régulier du robot permet de maintenir la population d'adventices à un niveau faible. Lorsque le robot passe deux fois par semaine, le recouvrement du sol n'est que de 12%. On peut voir sur la photographie que les adventices sont peu développées et que lorsque des cultures seront installées la concurrence pour les rayons solaires sera faible, il reste beaucoup d'espace disponible pour les cultures.

Discussion

D'après les suivis quantitatifs et les photographies qui appuient ces résultats, nous avons pu tirer la conclusion que notre choix initial de fréquence n'était pas adapté aux conditions de l'expérience : la fréquence seuil de passage d'une fois par semaine est trop faible, l'indice de surface foliaire projetée est trop important dans cette zone et les adventices sont trop développées. Nous pouvons par contre proposer une nouvelle solution pour la fréquence de passage minimale : les résultats quantitatifs et qualitatifs montrent que la fréquence de deux passages par semaine offre un désherbage efficace. Le recouvrement du sol par les adventices n'est pas assez important pour entrer en compétition pour les rayons solaires et elles sont maintenues à un stade de développement trop jeune pour entrer en concurrence avec les cultures qui seront installées pour les nutriments et l'eau. Ces cultures seront repiquées, elles seront donc plus robustes et plus développées que les adventices encore présentes. Cette fréquence devra très probablement être adaptée en fonction des conditions climatiques, de la composition du sol, des saisons et de la localisation de l'exploitation maraîchère. Cette quantité tolérée d'adventices présentes sur la parcelle dépend de l'exigence du maraîcher concernant la propreté de ces planches. Cette population présente peut être modulée grâce à un nombre de passage différent : plus le robot passe, plus la planche est propre. L'agriculteur peut choisir le nombre de passage en fonction de sa tolérance aux adventices. Lorsque les conditions environnementales sont propices au développement rapide des plantes, plantes potagères ou adventices, la fréquence de passage doit être plus importante que lorsqu'elles sont moins favorables. De nouvelles expériences devront être mises en place sur toute la durée de la période de culture (d'avril à octobre) pour proposer des fréquences adaptées à toutes les conditions climatiques rencontrées pendant cette période.

C) Expérience testant l'influence du robot sur la germination des adventices

Présentation de l'expérience

La deuxième expérience testait l'hypothèse qui supposait que le passage du robot influençait la germination des adventices en l'inhibant. Pour cela la zone expérimentale dédiée à cette expérience a été découpée en deux zones (voir la Figure 17 ci-dessous). Dans chacune d'elles était semée la même quantité du mélange d'adventices ray-grass, phacélie et sarrasin. Le robot passait une fois trois jours après le semis sur une des deux zones, l'autre n'était jamais travaillée. Le développement des adventices était suivi tout le long du mois de l'expérience. Le but étant de voir si les adventices semées dans la zone travaillée par le robot levaient et se développaient plus ou moins vite que les adventices présentes dans la zone non travaillée.

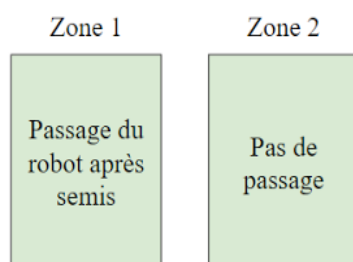


Figure 17 : Schéma de l'organisation spatiale de l'expérience sur l'influence du passage du robot sur la germination des graines d'adventices

Résultats

Influence du passage du robot sur la germination des adventices

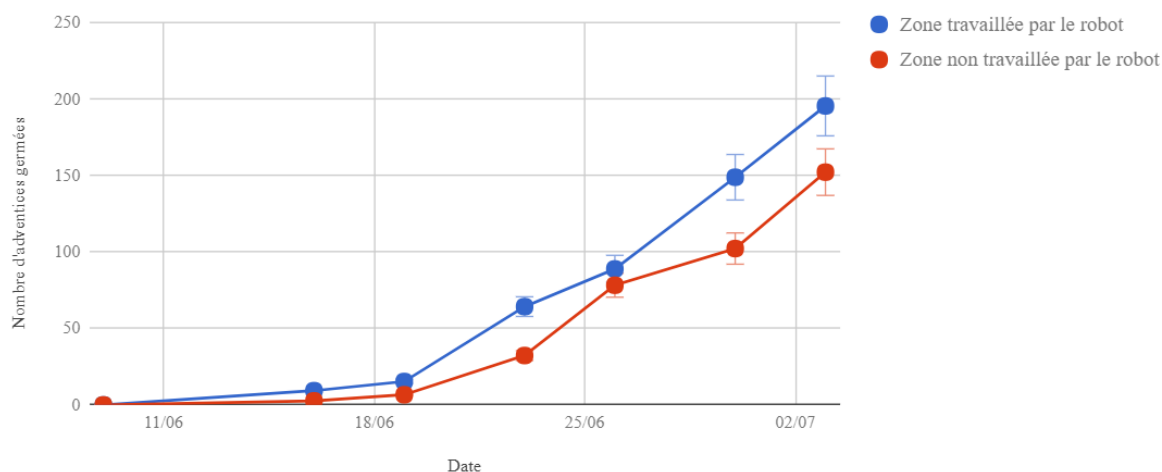


Figure 18 : Graphique présentant l'influence du passage du robot sur la germination des adventices (mois de juin)

Le graphique ci-dessus (Figure 188) présente le nombre d'adventices germées dans des zones où le robot est passé trois jours après le semis (courbe bleue) et où le robot n'est jamais passé après le semis (courbe rouge). Dans cette série d'expérience nous pouvons voir que le passage du robot favorise la germination des adventices : les adventices ont plus germé dans la zone travaillée par le robot que dans la zone non travaillée par le robot.

Cette expérience a été relancée au cours du mois de juillet pour valider les premiers résultats, à savoir que le robot favorise la germination des adventices par son passage et son travail superficiel du sol.

Influence du passage du robot sur la germination des adventices (mois de Juillet)

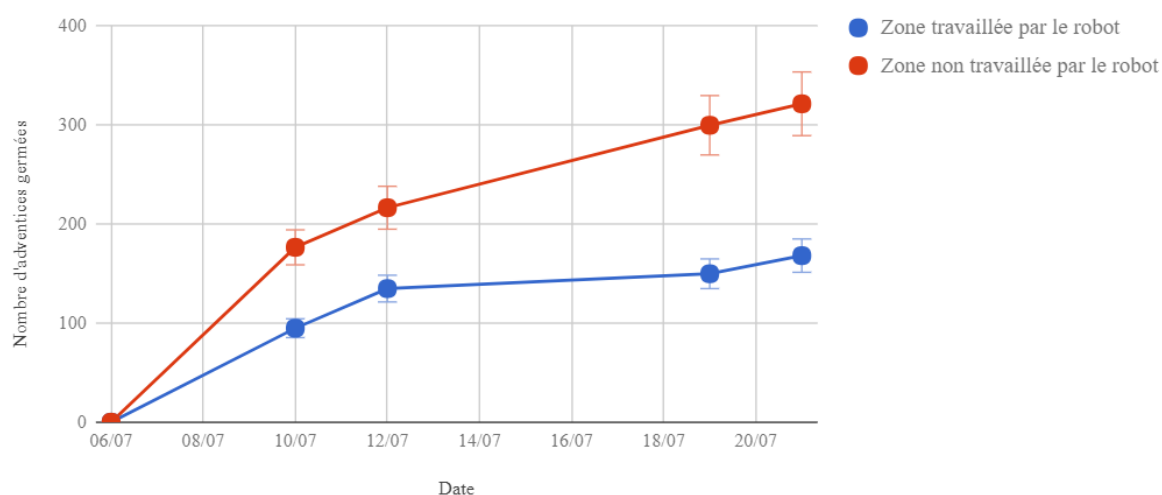


Figure 19 : Graphique présentant l'influence du robot sur la germination des adventices (mois de juillet)

Ici les résultats (Figure 19) sont différents : les adventices ont plus germé dans la zone laissée intacte par le robot : au bout de 6 jours : la zone travaillée par le robot contenait 135 adventices germées tandis que la zone non travaillée par le robot contenait 215 adventices.

La différence de résultats dans ces deux séries d'expériences peut s'expliquer à travers la biologie, les mécanismes de germination des graines et les conditions climatiques. Le labour de surface fait par le robot peut avoir deux résultats possibles :

- un assèchement du sol lorsque qu'il est fait dans une période de sécheresse avec une influence néfaste sur la germination des graines qui n'auront pas l'apport d'eau nécessaire pour entrer en phase d'imbibition
- ou une aération du sol qui, combinée à des apports d'eau importants, facilitent la germination des graines qui se trouvent dans des conditions environnementales idéales pour germer (oxygène et eau en quantités suffisantes). Le travail du sol dans ces conditions va favoriser le contact entre les graines et la terre humidifiée, elles germeront plus facilement.

L'assèchement du sol a eu lieu dans les expériences du mois de juillet : les conditions météorologiques étaient les suivantes : fort ensoleillement et une pluviométrie très faible, tandis qu'en juin, la pluviométrie du début du mois (période de lancement de l'expérience) était importante. Ces résultats proviennent des données météorologiques récoltées par les Parrots installés dans la zone d'expérimentation. Ces analyses sont des suppositions et il faudra refaire les expériences dans ces deux conditions météorologiques pour pouvoir les affirmer de manière certaine.

Discussion

Nous ne pouvons pas généraliser la confirmation ou l'infirmer de notre hypothèse de départ. Dans certaines conditions, l'hypothèse est confirmée : le passage du robot inhibe la germination des adventices, dans d'autres conditions, la germination est favorisée, entraînant une infirmer de l'hypothèse. Des propositions agronomiques et biologiques peuvent être apportées pour tenter d'expliquer ces deux résultats. Dans l'expérience du mois de juillet, le travail du sol a provoqué l'assèchement du sol et des graines, empêchant leur germination. Dans l'expérience du mois de juin, dû à d'importants apports d'eau (pluviométrie importante du début du mois de Juin) le travail du sol a aéré le substrat et a permis une meilleure pénétration de l'eau dans le sol. Les graines de cette zone ont pu ainsi mieux entrer en contact avec le sol humidifié par les pluies conséquentes du début du mois de Juin et leur germination a été plus rapide que les graines présentes dans la zone non travaillée.

Même si ces résultats restent à confirmer avec de nouvelles répétitions ils peuvent être utilisables dans des stratégies différentes :

- le robot peut être utilisé dans un travail préalable du sol avant implantation d'une culture. Dans un cas il peut être utilisé pour préparer un faux-semis : son passage permettra de faire lever les adventices rapidement avant la culture. Ces adventices seront détruites avant l'installation de la culture et cette action fera diminuer le stock de graines d'adventices présent naturellement dans les sols cultivés. Cette technique est déjà très utilisée par les professionnels, ici elle pourra être lancée par le robot sans avoir besoin d'utiliser de la main-d'œuvre pour la mettre en place. -l'influence inverse qui a été présentée, c'est-à-dire l'inhibition de la germination des adventices par le passage du robot peut être également appliquée dans les champs avant l'installation de la culture pour ralentir le développement des adventices dans les parcelles.

D'autres expériences mises en place dans des conditions météorologiques différentes devront être faites pour préciser l'influence du robot sur la germination et pour proposer différentes méthodes d'utilisation de ce dernier en fonction des conditions climatiques présentes.

D)Expérience testant la capacité du robot à désherber tout type d’adventice

Présentation de l’expérience

Pour tester l’efficacité du robot sur sa capacité à arracher des adventices déjà installées sur la planche de culture nous avons mis en place une troisième expérience. Le système racinaire est un bon discriminant pour représenter les différents types d’adventices présents dans les exploitations maraîchères en ce qui concerne la capacité du robot à les déterrer. Le choix a donc été légèrement différent des premières expériences dans lesquelles le critère principal était la période germination courte. Nous avons choisi l’oseille *Rumex acetosa*, pour représenter les plantes au système racinaire pivotant et le ray-grass anglais ayant un système racinaire fasciculé typique des monocotylédones (Minette, 2009) (Prat et Rubinstein, 2008). Dans cette expérience nous testions la capacité du robot à désherber différentes adventices mais aussi sa capacité à les désherber lorsque que celles-ci avaient atteint un certain stade de développement.

Ici la zone d'expérimentation était découpée en quatre zones (voir la Figure 20 ci-dessous) :

- dans les deux premières était semé du ray-grass,
- dans les deux suivantes était semé de l’oseille

Le robot passait une fois sur les zones à des stades différents de croissance des adventices : stade premières feuilles et stade plantule dans lequel les plantes mesuraient quelques centimètres et étaient plus robustes. Un suivi qualitatif et quantitatif (photographies prises) était fait après le passage du robot : immédiatement après le passage du robot et trois jours après pour mesurer l’effet à long terme du passage.

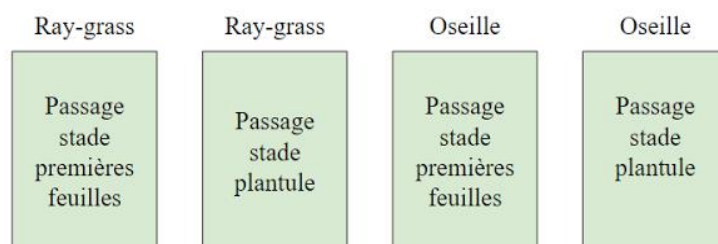


Figure 20 : Schéma de l'organisation spatiale de l'expérience testant la capacité du robot à désherber différents types d'adventices à différents stades de développement

Résultats

Les résultats de cette expérience sont qualitatifs et quantitatifs : des photographies ont été prises avant et après le passage du robot sur les zones et les indices de surface foliaire projetée du ray-grass anglais et de l’oseille ont été mesurés pour donner un indicateur de la quantité de plants arrachés par le robot. Ces photographies permettent de suivre la qualité du désherbage fait par le robot.



Figure 21 : Photographies de l'oseille (à gauche) et du ray-grass anglais (à droite) avant le passage du robot (Source : David Colliaux)



Figure 22 : Photographie de l'oseille (à gauche) et du ray-grass anglais (à droite) après le passage du robot (Source : David Colliaux)

Les photographies, Figure 21 et 22, ne présentent pas clairement les résultats de cette expérience : apparaissent encore sur les photographies les plants d'oseille arrachés par le bras du robot. De plus l'architecture du ray-grass anglais ne permet pas de voir clairement les résultats du passage du robot : le ray-grass a une architecture de graminée, une photographie prise de dessus ne rend pas bien compte de son développement.

Malgré la qualité des images nous avons pu mesurer le pourcentage de recouvrement de l'oseille et du ray-grass avant et après le passage du robot (Tableau 2). Ces données mettent en avant la quantité d'adventices désherbées par le robot.

Les résultats présentés ci-dessous correspondent aux expériences faites sur les adventices (oseille et ray-grass) au stade plantule de quelques centimètres. Les photographies des adventices au stade premières feuilles ne fournissent aucuns résultats via le traitement d'images, les adventices sont trop petites pour permettre de présenter des chiffres représentatifs de la qualité du désherbage effectué. De plus les expériences ont fonctionné sur des adventices au stade deux premières feuilles et à un stade de développement plus avancé. J'ai donc choisi de présenter les résultats des expériences faites sur les adventices plus développées.

Tableau 2: Indice de surface foliaire projetée des adventices avant et après le passage du robot (en %)

	Avant le passage du robot	Après le passage du robot
Oseille	37,5	3,9
Ray-grass	15,9	7,8

Grâce à ces indices de surface foliaire projetée et aux photographies des zones travaillées par le robot nous pouvons dire que le robot est capable de désherber des adventices ayant un système racinaire pivotant et des adventices ayant un système racinaire fasciculé au stade deux premières feuilles et au stade plantule.

Discussion

Le robot est capable de désherber les adventices qu'elles aient un système racinaire pivotant ou fasciculé. De plus au cours de cette expérience, nous avons pu faire l'observation suivante : les vis du bras animé ont différentes manières de désherber les adventices (Figure 23) : elles peuvent arracher les plantes entières, les couper mais aussi les plier à l'endroit du collet. Le développement des adventices est arrêté lorsqu'elles sont pliées et les observations faites 3 jours après le passage du robot montrent que ce pliage entraîne la mort des adventices.



Figure 23 : Plants d'oseille arrachés et coupés (plant du milieu) par l'outil désherbeur du robot (Source Lisa Garlanda)

Même si ces résultats sont satisfaisants, nous ne devons pas oublier que nous avons travaillé sur des plantes jeunes et que les plants d'oseille et de ray-grass anglais ne dépassaient pas une dizaine de centimètres. Il faudra tester à l'avenir la robustesse de l'outil sur des adventices plus âgées avec un appareil racinaire plus développé.

E) Discussion générale sur les expériences

Les expériences ont mis du temps à se mettre en place. Nous avons eu des contretemps dû à l'exploitation des images par le robot : il a fallu une longue période d'adaptation entre les tests faits dans des conditions idéales de laboratoire et les conditions réelles dans lesquelles tous les paramètres de traitement des données sont variables. Ces difficultés sont apparues au cours de la première expérience présentée dans la partie II) A) : Expériences menées en parallèle.

D'un point de vue de la robotique ces problèmes ont permis de rendre l'algorithme plus efficace mais surtout plus adapté à son environnement de travail.

En revanche, les expériences ont été remodelées et la période d'expérimentation a été raccourcie due à ces développements. Les protocoles expérimentaux présentés dans ce mémoire n'ont pu être mis en place qu'en mai, ce qui a réduit la période pour mener les expériences.

Ainsi la limite la plus importante de ces résultats d'expérience est le manque de répétitions et de reproductibilité. On peut le voir dans l'expérience sur l'influence du robot sur la germination : pour pouvoir affirmer les explications biologiques proposées dans l'analyse il aurait fallu relancer de nombreuses fois ces expériences en mesurant de manière précise les facteurs extérieurs qui variaient. Ces résultats préliminaires donnent déjà aux chercheurs Peter Hanappe et David Coliaux des idées d'amélioration et d'utilisation du robot mais nécessitent des répétitions.

Il faudra également refaire les expériences préliminaires qui cherchaient à mesurer l'influence du robot sur le développement et le rendement des légumes et fruits plantés dans des parcelles désherbées par celui-ci.

Des mesures de temps de désherbage fait par un humain ont été faites lors des expériences : je me suis chronométrée pendant que je désherbais des parcelles de pleine terre de 0,64 m². Ces mesures ont permis de comparer le temps de désherbage d'un humain et du robot LettuceThink.

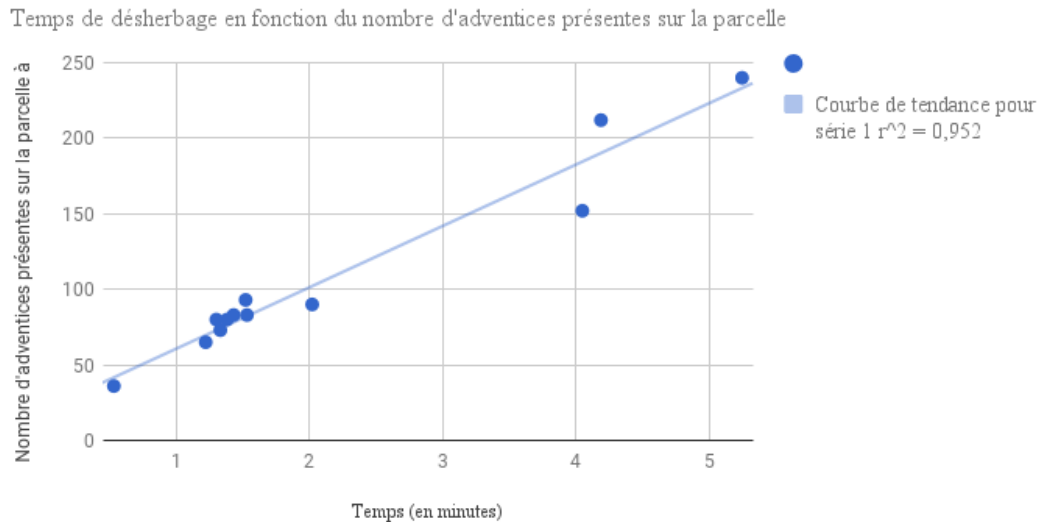


Figure 24 : Graphique présentant le temps de désherbage pratiqué par un humain en fonction du nombre d'adventices présentes sur la parcelle à désherber

Le graphique de la Figure 24 montre que le temps de désherbage fait par humain augmente proportionnellement avec le nombre d'adventices présentes sur la parcelle à désherber. Le temps de désherbage peut monter jusqu'à 5 minutes lorsque la parcelle est envahie d'adventices. Le robot LettuceThink, lui, a un temps de désherbage constant d'environ 2 minutes quel que soit la quantité d'adventices présentes. Son temps de désherbage dépend du chemin dessiné par l'algorithme. Cette expérience est à refaire avec d'autres personnes, plus habituées à désherber que moi et donc plus rapides.

Des expériences parallèles, comme celle présentée ci-dessus, ont été menées dans lesquelles les plantes potagères présentées plus haut ont été cultivées et ont servi pour créer une base de données sur la croissance des cultures. De plus, tout au long du stage des modifications ont été faites sur le robot, que ce soit sur la partie traitement numérique ou sur la partie mécanique. Ces changements ont été testés pour voir s'ils permettaient d'optimiser sur le terrain les performances du robot LettuceThink.

F) Améliorations qui ont découlé des observations terrains

Au cours des expériences, nous nous sommes rendu compte que le robot pouvait accomplir d'autres tâches que le désherbage. Les lignes qu'il trace dans le sol lors de son passage peuvent être utilisées comme sillons pour semer des graines en semis directs et repiquer des plants. Il évitera ainsi au maraîcher d'avoir à tracer des sillons ou de tirer des cordes tout le long des planches pour travailler sur des lignes parfaitement droites et parallèles.

Le travail du sol qu'il fait peut être considéré comme un travail de sol superficiel fait en amont de l'implantation d'une culture.

Ces expériences ont également permis à Peter Hanappe et David Coliaux d'apporter de nombreuses améliorations sur le robot, dans la partie algorithmique et mécanique.

Au début des expériences, tout l'algorithme qui traitait les images avait été créé lorsque le robot était dans un environnement contrôlé idéal : la luminosité était toujours la même que ce soit en intensité ou en localisation, il n'y avait pas de zones d'ombre. Lorsque le robot a été utilisé pour la première fois au collège Pierre Mendès-France des ajustements concernant la luminosité sur les photographies ont dû être faits. Dans les conditions réelles la luminosité change en fonction des heures de la journée, de la saison, des conditions météorologiques, de l'incidence des rayons solaires sur la zone prise en photographie, etc.

Les solutions apportées pour régler ce problème sont insérées dans le code source que je ne présenterai pas dans ce mémoire.

Pour la navigation du robot et son repérage dans l'espace au sein des différentes parcelles à travailler, nous avons installé des objets de couleur. Le principe des marqueurs pourra être utilisé dans les exploitations maraîchères pour faciliter son déplacement. L'autre méthode permettant au robot de se déplacer de manière autonome dans l'exploitation serait d'utiliser une licence GPS mais ces licences sont très onéreuses et feraient augmenter de prix du robot de manière trop importante.

Au cours des expériences, de nouvelles idées pour traiter les images sont apparues, nous n'avons pas pu les mettre en place durant ces expériences mais ces pistes seront étudiées pour des futures améliorations :

- l'algorithme peut discriminer les plantes sur le nombre de leurs feuilles. Si le passage est assez régulier, les adventices ne vont pas dépasser le stade des deux premières feuilles tandis que la plante cultivée a été repiquée, elle aura donc déjà dépassé le stade premières feuilles. Le robot n'aura pas besoin de reconnaître les plantes grâce à leur phénotype mais pourra plus simplement compter les feuilles et ainsi les différencier grâce à leur stage de développement. Il passera sur les zones non vertes et sur les plantes qui n'ont que deux feuilles car il saura que se sont des adventices,
- les expériences ont montré que lorsque le bord des feuilles de la culture principale est utilisé pour délimiter des zones où il ne faut pas désherber de nombreux espaces sous ces feuilles sont laissés intacts si la culture a des grandes feuilles retombantes. Ces parties laissées intactes procurent aux adventices un espace protégé pour développer. Il faudra considérer l'architecture de l'appareil aérien des cultures : si les feuilles sont grandes et qu'elles recouvrent beaucoup le sol, il faudra prendre en compte d'autres paramètres architecturaux que le bord des feuilles pour délimiter les zones à désherber et faire un désherbage plus précis.
- il peut prendre en compte la géométrie de semis : les professionnels sèment leurs graines ou repiquent les plants avec une distance plus moins planifiée entre chaque semis et plant. Peut-être qu'entrer dans le logiciel les distances entre les plants pourra ainsi lui permettre de les distinguer dans la zone cultivée et pourra les éviter dans son chemin de désherbage.
- une autre amélioration sûrement possible à l'avenir serait que le robot soit capable de reconnaître les plantes potagères et les adventices et qu'il désherbe seulement les plantes nécessaire. Il faut une importante base de données d'images de plantes potagères et d'adventices pour la mettre en place. Les images récoltées pendant ce stage seront utilisées pour initier cette base de données.

Les améliorations juste présentées concernent l'algorithme qui fait le traitement des images des parcelles cultivées. Des idées de modifications de la partie mécanique pour la rendre plus effective sont aussi apparues durant le stage. Suite aux observations lors du passage du robot sur des adventices installées depuis une dizaine de jours et ayant atteint une dizaine de centimètres, nous nous sommes rendus compte que le chemin que le robot prenait ne couvrait pas assez le sol et que certaines zones n'étaient pas désherbées. En effet le bras dessine un chemin particulier lorsqu'il désherbe, ce chemin est appelé boustrophédon, voir le premier schéma de la Figure 25. Avec ce chemin de nombreux espaces ne sont pas traités par l'outil désherbeur du robot. Nous avons donc décidé de tester de nouveaux chemins qui font passer le bras de manière plus uniforme sur la parcelle à désherber. Nous avons testé un nouveau chemin dans l'expérience sur les systèmes racinaires : le double boustrophédon. Le désherbage fait par le robot est plus complet : toutes les zones sont désherbées et le désherbage est de meilleure qualité.

Nous avons également pensé à un autre chemin : un chemin inspiré de la courbe de Hilbert. Ce dernier chemin sera testé dans des expériences ultérieures.

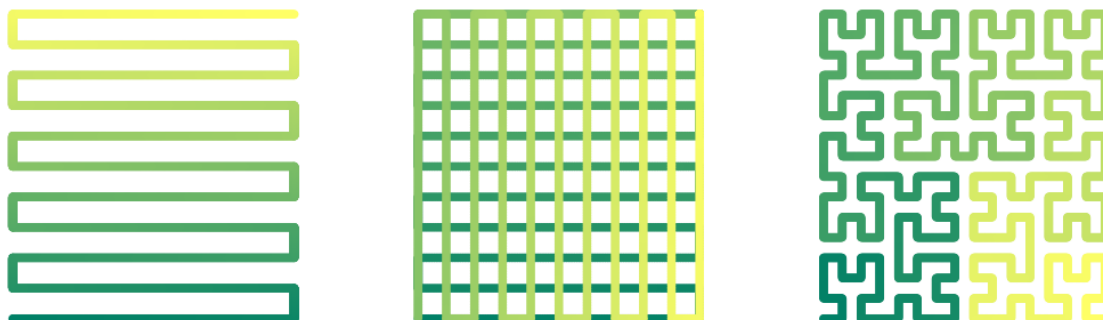


Figure 25 : Schéma des chemins pris par le bras animé du robot : simple boustrophédon, double boustrophédon et courbe de Hilbert (Source : David Coliaux)

Un problème assez simple est apparu : la hauteur du bras est fixée pour une zone donnée, il ne s'adapte donc pas aux aspérités du sol. Il a fallu faire varier les hauteurs du bras régulièrement. Une nouvelle version du bras a été imaginée avec une structure qui laisse au bras la possibilité de s'adapter aux dénivelés du sol. Le nouveau bloc portant le bras animé (installé sur la CNC) autorise le bras à bouger verticalement sur quelques centimètres. L'outil reste posé sur le sol simplement grâce à son poids. (Figure 266).

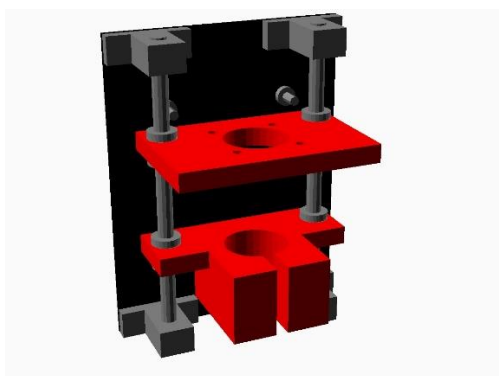


Figure 26 : Schéma 3D du futur bloc portant le bras animé installé sur la CNC (Source : Peter Hanappe)

Des ajustements au niveau de la CNC, des montants portant le bras et le bras lui-même ont été réalisés pour les rendre plus solides. Lorsque le robot passait quand il faisait sec et que la terre était dur, la résistance du bras faisait que de nombreuses pièces sortaient de leurs rails. Les nouvelles versions auront des systèmes d'attaches plus souples qui ne se détacheront pas à cause des vibrations et des chocs.

En conclusion, au sortir de ces expériences, des résultats ont été trouvés concernant l'efficacité du robot : la fréquence de passage adaptée aux conditions climatiques de ces expériences est de deux passages par semaine, le robot peut être utilisé pour travailler le sol en amont de l'installation d'une culture car il a une influence sur la germination des graines d'adventices et il est capable d'arracher des adventices avec des systèmes racinaires différents à des stades de développement multiples. Au cours de ces expériences, de nombreuses améliorations sur le plan algorithmique ont été faites, permettant au logiciel d'être plus adapté aux futures conditions d'utilisation du robot. Ces expériences ont également permis d'ouvrir de nouvelles pistes de modification d'un point de vue algorithmique et mécanique et d'affiner les protocoles expérimentaux pour de nouvelles séries d'expérimentations. D'autres pistes d'amélioration ont aussi été trouvées grâce aux entretiens avec les maraîchers professionnels rencontrés dans le cadre du stage. Ce sujet a été abordé avec chacun d'eux et tous avaient des propositions.

III) État des lieux des pratiques concernant la gestion des adventices chez des maraîchers du Nord de la France et de leur vision de la robotisation de leur métier

Des rencontres avec des professionnels du maraîchage n'étaient pas prévues au début du stage, cette enquête est apparue comme nécessaire au cours des discussions autour des améliorations envisageables pour le robot LettuceThink. Le robot a été pensé suite à une discussion avec un seul maraîcher. Nous avions besoin de généraliser les informations récoltées lors de cette discussion via d'autres rencontres pour valider la pertinence du robot. Ces entretiens avec des professionnels du maraîchage nous ont permis d'étudier les besoins des agriculteurs en termes d'outils robotiques et nous ont fourni des données pour améliorer son fonctionnement. Les agriculteurs nous ont également proposé de nouvelles fonctionnalités pour le robot pour qu'il puisse être le plus utile possible dans une exploitation.

A) Présentation du questionnaire soumis aux maraîchers rencontrés

L'objectif de ces entretiens était de récolter des informations sur deux sujets cruciaux pour le développement futur du robot : les techniques de gestions des adventices utilisées par des professionnels mais aussi leur point de vue sur le fonctionnement du robot LettuceThink et leur possible intérêt pour celui-ci. Ces sujets allaient donner des clés importantes pour adapter le robot aux pratiques des professionnels et de leurs besoins réels.

Les maraîchers cibles de cette enquête étaient des maraîchers professionnels pouvant être intéressés par le travail de désherbage du robot. Il s'agissait de maraîchers cultivant sans ajout de produits phytosanitaires, ayant la certification agriculture biologique ou non, installés depuis plusieurs années, possédant une exploitation de petite taille, pas plus de 10 hectares, et vendant leur production en circuits courts. Nous souhaitions rencontrer des maraîchers installés depuis quelques années car nous les voulions dans une certaine stabilité économique, ils pouvaient être prêts à investir dans la technologie que nous leur présentions et avaient déjà été confrontés aux problématiques de gestion des adventices sur leurs exploitations.

L'enquête a été faite sous forme d'entretien semi-directif à questions ouvertes. Nous demandions aux agriculteurs interrogés d'être le plus exhaustif possible dans leurs réponses, tout en sachant qu'il serait parfois difficile pour eux de nous fournir toutes les informations. Dans la partie discussion sur le robot nous voulions laisser les maraîchers nous faire part de toutes leurs impressions et de tous leurs besoins, même ceux qu'ils jugeaient trop compliqués à satisfaire pour avoir une vision globale des tâches utiles que le robot pourrait accomplir par la suite.

Le questionnaire s'organisait en trois grandes parties.

La première partie comptait des questions d'ordre général qui permettaient de caractériser les maraîchers et leurs exploitations. Elle contenait 13 questions qui concernaient le parcours du maraîcher rencontré, la surface de l'exploitation, le type de commercialisation, la labellisation des produits, le nombre de salariés, etc.

La deuxième partie incluait des questions tournées vers leurs techniques de gestion des adventices. Les questions posées, du nombre de 8, abordaient différents sujets :

- les adventices les plus communes présentes sur leurs parcelles
- les techniques de gestion et maîtrise des adventices utilisées
- les outils, motorisés ou non, utilisés
- les cultures les plus sensibles à la concurrence des adventices
- le temps passé au désherbage.

Cette partie a été créée pour adapter au mieux le fonctionnement du robot aux techniques les plus utilisées par les professionnels du panel choisi.

La troisième et dernière partie était organisée comme une discussion autour du robot. Elle comportait 8 questions. Suite à une présentation rapide de son fonctionnement et de sa structure, plusieurs thèmes étaient abordés :

- leur intérêt pour la mécanisation d'une partie de leur métier,
- les freins possibles liés à l'utilisation du robot en son état d'avancement,
- les modifications possibles qui le rendrait plus adapté à leurs besoins et à leurs exploitations,
- les autres tâches que le robot pourrait faire pour être une véritable aide au maraîcher.

Dans la même optique que la partie ci-dessus, les sujets abordés ici ont été une source d'inspiration ayant trait à toutes les améliorations envisageables sur le robot LettuceThink pour les chercheurs Peter Hanappe et David Coliaux.

B) Présentation et analyse des résultats des entretiens

Malgré la période estivale peu adaptée pour rencontrer des professionnels du milieu agricole en pleine période de récolte, nous avons réussi à nous entretenir avec 9 personnes.

Même si nous voulions favoriser les entretiens de visu, il n'a pas toujours été possible d'aller rencontrer tous les maraîchers sur leurs exploitations. Trois entretiens ont été fait au téléphone, les six autres ont été de visu. Lors des entretiens téléphoniques j'étais seule avec le maraîcher, pendant les entretiens de visu, il y avait souvent une tierce personne, soit Peter Hanappe, soit Ariane Courcier, une stagiaire du laboratoire étudiant à Agrocampus Ouest, site de Rennes, qui m'accompagnait lors des visites des fermes.

La prise de contact avec les maraîchers s'est faite de deux manières. Nous connaissions déjà une grande partie d'entre eux et la prise de contact avec eux a été rapide et facile. Les autres contacts ont été donné par des institutions du monde agricole : j'ai contacté le GAB Ile-de-France, le réseau AMAP Ile-de-France et des sites de vente en circuits courts comme Kelbongoo pour leur présenter le projet et leur proposer de parler du robot LettuceThink aux maraîchers pour savoir s'ils étaient intéressés par le projet et prêts à me répondre. Ces institutions et organisations de vente en circuits courts ont transmis la présentation du robot à des maraîchers et certains m'ont répondu positivement. De ces prises de contact ont découlé des prises de rendez-vous soit téléphonique soit sur l'exploitation.

Initialement, 13 maraîchers m'ont répondu à propos de l'entretien, je n'ai jamais réussi à organiser un rendez-vous pour faire l'entretien avec deux d'entre eux. Les deux autres maraîchers n'ont pas souhaité répondre à mon questionnaire, étant contre la robotisation du métier de maraîcher ils ne voulaient pas :

*« Alimenter la machine et donner à une entreprise privée des bonnes idées qui nous appartiennent. L'entreprise va faire du profit sur notre dos ».*¹

Caractérisation des maraîchers et de leur exploitation

La première partie du questionnaire permettait de récolter des informations sur les exploitants et leurs fermes.

Le panel d'exploitant rencontré comportait neuf personnes : trois femmes et six hommes. La moyenne d'âge du groupe est de 36 ans. Les maraîchers rencontrés viennent d'horizons différents : quatre d'entre eux avaient fait une reconversion professionnelle en se tournant vers le maraîchage (deux d'entre eux sont des anciens ingénieurs, les deux autres ont fait des études tournées vers la littérature), trois d'entre eux ont suivi une formation d'ingénieur agronome et les deux derniers ont fait des formations courtes dans le domaine agricole. Parmi ces neuf personnes, deux d'entre elles ont repris une exploitation familiale, les sept autres se sont installées hors cadre familial. La plus ancienne exploitation a été reprise il y a 20 ans et en moyenne les agriculteurs se sont installés il y a 5 ans.

En dehors des fermes urbaines associatives et de l'exploitation de 85 hectares (dans laquelle l'exploitant n'est propriétaire que de 5 hectares, le reste étant un bail rural), tous les maraîchers sont propriétaires

¹ Les phrases en italiques correspondent à ces citations des maraîchers.

de leurs terres cultivées. Les associations ont signé des conventions d'occupation avec la Mairie de Paris pour une certaine durée. Ces durées changent en fonction des lieux occupés mais elles vont de 9 à 12 ans.

Les structures des exploitations interrogées sont très diverses : deux sont des fermes urbaines gérées par des associations : Veni Verdi, qui est une association d'agriculture urbaine travaillant au sein de bâtiments scolaires et Les Amis Recycleurs de la REcyclerie l'association d'agriculture urbaine installée le long d'anciens rails de trains dans une gare du Nord de Paris. Les autres sont des exploitations maraîchères plus classiques en zone péri-urbaine et rurale. Nous souhaitons rencontrer les associations car nous avons l'espoir que d'autres maraîchers, peut-être avec un statut professionnel et non associatif, viendront s'installer dans le milieu urbain. Leurs exploitations prendront, peut-être, une forme similaire aux fermes associatives rencontrées. Ces rencontres nous ont permis de récolter des informations sur les techniques culturales choisies, les contraintes liées à ce milieu particulier et d'utiliser ces données pour anticiper les besoins des futurs agriculteurs urbains. Dans la suite de la présentation des résultats, les données récoltées auprès des maraîchers des fermes urbaines associatives et des maraîchers gérant les fermes professionnelles seront parfois séparées et parfois mises en commun. Les surfaces varient énormément : les fermes urbaines ont 1000m² et 6000m² cultivés tandis que les autres exploitations ont une surface moyenne de 4 hectares, sans compter une exploitation de 85 hectares.

En ce qui concerne la labellisation et les méthodes de production, un tiers des maraîchers possède la certification agriculture biologique, un tiers est en cours de conversion pour avoir la certification AB et n'a jamais utilisé de traitement phytosanitaire sur ses parcelles, un maraîcher a le label Nature & Progrès et les deux fermes urbaines cultivent en appliquant les principes et les techniques culturales de l'agriculture biologique.

Les diverses formes de commercialisation utilisées par les maraîchers pour vendre leur production de légumes sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 3). Nous pouvons voir que tous les maraîchers multiplient les formes de commercialisation : chaque agriculteur vend ses produits au travers d'au moins deux voies de commercialisation différentes. Selon eux, cette multiplication de débouchés commerciaux leur permet de compenser les mauvais résultats d'une forme de commercialisation (si mauvais résultats il y a) par une autre. Les AMAP sont contraignantes en termes de diversité de légumes proposés mais offrent une sécurité de vente, les magasins à la ferme assurent aux maraîchers d'écouler tous les types de production plus facilement que la vente aux restaurateurs, qui préfèrent certains légumes à d'autres, etc. Cette diversité de débouchés permet aussi d'écouler plus facilement leur production.

Tableau 3 : Formes de commercialisation utilisées par les maraîchers

AMAP	4
Vente via Internet	4
Magasin à la ferme	2
Vente à des restaurateurs	4
Magasin de producteurs	1
Vente à une coopérative	1

Les fermes urbaines vendent une partie de leur production en utilisant les mêmes formes de commercialisation que les exploitations professionnelles. Ces fermes sont gérées par des associations, elles font aussi don d'une partie de leur production à leurs adhérents.

Sur les neuf exploitants interrogés, un seul n'emploie personne pour l'aider dans son travail. Le maraîchage diversifié est un système agricole qui emploie beaucoup (Tableau 4) : ces huit exploitations emploient douze ETP (équivalent temps plein) et douze saisonniers. D'après les maraîchers, les saisonniers viennent d'horizons différents : certains sont étudiants cherchant à travailler pendant l'été, certains des demandeurs d'emplois et d'autres encore font les saisons dans les exploitations maraîchères l'été et font des saisons dans des lieux touristiques l'hiver. Sur les sept exploitations maraîchères classiques, cinq des sept exploitants sont aidés par leurs conjointes.

Tableau 4 : Emplois et stages créés par les exploitations maraîchères

Emplois permanents à temps plein	11
Emplois permanents à mi-temps	2
Emplois saisonniers	12
Stagiaires	7

Toutes les exploitations sont liées à la ville soit par leur localisation, urbaine ou péri-urbaine, soit par leur modes de commercialisation : toutes vendent en circuit court : en vente directe via les AMAP, des magasins de producteurs, via une structure intermédiaire (Kelbongoo, La ruche qui dit oui) ou encore via une vente par Internet à des consommateurs citadins.

Techniques de gestion des adventices appliquées

Que ce soit dans les fermes urbaines ou dans les exploitations périurbaines et rurales les techniques de gestion des adventices se recoupent beaucoup. Durant l'entretien, les maraîchers étaient questionnés sur leurs pratiques de gestion des adventices et leurs réponses sont assez similaires. Seuls deux d'entre eux notent de manière précise les actions consacrées au désherbage au sein de leurs parcelles, les autres ne font pas de suivis aussi précis et prennent la décision de passer désherber une parcelle de leur exploitation lors du tour de leur exploitation qu'ils font régulièrement. En effet, tous nous ont indiqué avoir cette pratique : au moins deux fois par semaine, ils font le tour entier de leurs exploitations et prennent à ce moment-là les décisions concernant toutes les actions de gestion de la ferme.

100% des agriculteurs interrogés utilisent le paillage comme mode de gestion des adventices : 80% d'entre eux utilisent des bâches plastiques et 20% utilisent du paillage organique : paille, broyat et copeaux de bois. Le paillage est très utilisé car il offre beaucoup d'avantages :

« Le paillage permet aussi de réduire la consommation d'eau dans l'exploitation, de protéger la structure sol tout en le réchauffant et de faciliter la gestion des adventices en les étouffant. »²

Il est utilisé dans toutes les exploitations maraîchères professionnelles sous abris et en plein champ pour les cultures repiquées et il est présent sous forme de paillage inorganique : des bâches plastiques. Ce type de paillage reste le plus économique et le plus efficace même si certains exploitants préféreraient éviter des produits issus de l'industrie pétrochimique. Les bâches plastiques, pré-trouées ou non, sont installées sur les planches de cultures et les cultures sont repiquées dans les trous prévus pour les accueillir (Figure 27). Le paillage plastique étouffe les adventices et les privant de rayons lumineux, ce qui les empêche de germer et de se développer, tout en laissant l'espace aux cultures de se développer.

² Propos de monsieur Olivier Halluin



Figure 27: Bâches plastiques recyclables utilisées comme paillage dans les exploitations de Shizu Okada (à gauche) et Erwan Humbert (à droite) (Source : Lisa Garlanda)

Tous les maraîchers pratiquent le désherbage mécanique. Un tiers des maraîchers rencontrés ne sont pas motorisés (fermes associatives et exploitations professionnelles confondues), tous les autres pratiquent le désherbage mécanique avec des outils installés derrière un tracteur. Le tracteur est surtout utilisé pour désherber les champs de cultures en pleine terre. Les outils (entraînés par un tracteur ou utilisés manuellement) les plus utilisés sont la bineuse et la herse étrille. Ces deux outils désherbent en utilisant la même technique : des dents grattent la couche superficielle du sol et arrachent ainsi les adventices entre les rangs des cultures. Pour ceux équipés de matériel motorisé, le désherbage mécanique motorisé correspond à 50% du temps de désherbage, le reste du désherbage est fait manuellement ou grâce à des outils mis en mouvement manuellement (Figure 28).



Figure 28: Collection de sarcloirs et de pattes d'oies (photographie de gauche) et houe maraîchère (photographie de droite) (Source : Lisa Garlanda chez M. Humbert)



Figure 29 : Barre porte-outil développée à l'Atelier Paysan avec une bineuse installée derrière (photographie prise par Lisa Garlanda chez M. Humbert)

Le désherbage manuel reste encore très pratiqué, tous estiment qu'il correspond à au moins 40% du désherbage pratiqué dans l'exploitation. Il permet d'atteindre des zones dans lesquelles les outils, motorisés ou non ne peuvent pas aller. Le désherbage manuel est plus précis et plus délicat.

En ce qui concerne d'autres techniques de gestion d'adventices, 45% des maraîchers interrogés pratiquent le faux-semis avant l'installation des cultures et 33% font du désherbage thermique dans les cultures de pleine terre.

Même si aucun agriculteur ne suit de manière précise les heures passées aux différentes activités de l'exploitation, nous souhaitons une estimation du temps passé au désherbage. D'après les 6 agriculteurs qui ont pu nous répondre, en période estivale, qui est surtout une période d'entretien des parcelles et de récolte, le désherbage correspond à au moins 40% du temps passé dans les champs. Cette activité est surtout faite par les saisonniers engagés durant dans cette période de l'année.

En conclusion, le paillage est utilisé dans toutes les exploitations : il est présent sur toutes les surfaces couvertes et sur toutes les planches dans lesquelles les cultures ont été repiquées, le désherbage mécanique et thermique se pratique surtout sur les planches extérieures de plein champ où les cultures sont semées en semis direct. Le désherbage manuel est employé sur les planches couvertes et les planches extérieures. Il existe une véritable réflexion derrière l'utilisation de chaque outil de désherbage, l'idée principale étant d'optimiser les actions. Chaque maraîcher teste les outils pour trouver ceux qui sont les plus adaptés à ses techniques de cultures, à son sol et aux adventices couramment présentes sur son exploitation.

Les neuf maraîchers ont répondu unanimement à la question qui portait sur le type de culture le plus sensible à la concurrence des adventices. Tous ont répondu que ce sont les cultures de plein champ en semis direct avec une longue période de germination et de levée. L'exemple le plus représentatif de ce genre de culture est la carotte. Ils ont aussi indiqué l'oignon comme culture sensible aux adventices car c'est aussi une culture qui ne recouvre pas le sol de ses feuilles et qui ne va donc jamais étouffer les adventices qui se développent.

Discussion autour de la robotisation et de l'utilité potentielle d'un robot tel que le robot LettuceThink au sein de l'exploitation des maraîchers rencontrés

La dernière partie de l'entretien concernait le robot LettuceThink. Après une courte présentation du fonctionnement du robot, quatre thèmes principaux étaient abordés :

- leurs avis sur la robotisation de leur métier et l'apparition de robots dans les exploitations maraîchères,
- les freins possibles à l'utilisation du robot,
- les améliorations envisageables sur le robot pour le rendre plus performant et adapté au terrain,
- les nouvelles activités faisables par le robot.

En majorité, les maraîchers rencontrés ne sont pas réfractaires à la présence de robots dans les exploitations agricoles. Les agriculteurs qui ont émis le plus de doutes sur la robotisation n'ont pas souhaité s'entretenir avec moi. Selon les agriculteurs rencontrés les robots pourraient être intéressants pour différentes raisons. Certains pensent que la demande croissante des consommateurs pour des produits issus de l'agriculture biologique va pousser les grosses exploitations maraîchères de type système légumier de plein champ à se lancer dans l'agriculture biologique.

*« Avec leurs capacités d'investissements importantes, ces exploitations traiteront le problème du désherbage en achetant des outils robotisés. Nous on ne pourra jamais acheter des outils aussi chers et on se fera manger parce qu'on passera trop de temps là-dessus au lieu de s'intéresser à de nouvelles filières de commercialisation que ces exploitations ne visent pas. »*³

L'utilisation de robot pourrait donner la possibilité à ces fermes maraîchères de petite taille de rester compétitives face à ces exploitations en déléguant une des tâches les plus chronophages du métier à un robot, ce qui leur permettrait de se dégager du temps pour développer d'autres activités. D'autres maraîchers étaient intéressés par le fonctionnement du robot qui est capable de désherber entre les rangs de manière précise. Ils se disaient prêts à acheter le robot si, après preuve de son efficacité, il était plus économe que de la main-d'œuvre. Tous les maraîchers ont reconnu que le désherbage était une des tâches les plus pénibles de leurs activités et que l'idée de déléguer cette tâche leur plaisait.

Tous ont émis des réserves concernant l'utilisation sur le terrain du robot. Six d'entre eux ont parlé du problème de robustesse des produits qu'ils avaient pu voir ailleurs. Le robot doit être capable de supporter les conditions environnementales et climatiques du terrain, c'est-à-dire la poussière, la pluie, la rouille, les changements importants de température, etc. Les maraîchers ne sont pas intéressés par un produit qui doit subir des réparations constantes. Le robot doit également être assez robuste pour se déplacer dans toute l'exploitation et doit pouvoir s'adapter aux discontinuités et aux changements de terrain présents dans une exploitation maraîchère classique.

*« J'ai vu une vidéo de présentation d'un nouveau robot où on le voyait butter sur un caillou, j'ai tout de suite su que je l'achèterai jamais, j'ai besoin de quelque chose de solide et adapté un terrain de mon exploitation. »*⁴

De manière contradictoire, les maraîchers urbains ont exprimé l'idée que le robot est trop lourd et encombrant pour être transporté : les fermes urbaines qui se développent travaillent sur une multitude de sites et si le robot est utilisé, il doit l'être sur tous les sites. Il faut que le robot soit transportable en ville d'un site à un autre. Un autre maraîcher, cette fois périurbain, a dit que pour pallier au manque de robustesse concernant les déplacements du robot au sein des parcelles, le robot doit pouvoir être transportable, dans une brouette par exemple. Ainsi une personne seule pourrait le déplacer dans toute l'exploitation.

Le robot ne peut être intéressant économiquement que si son travail remplace celui d'un homme et qu'il agit aussi rapidement qu'un homme, les maraîchers rencontrés ont peur que le robot soit trop lent : le désherbage ne peut se faire que sur un laps de temps assez court compte tenu des conditions météorologiques et il doit être efficace durant ces courtes périodes. Le robot ne doit pas non plus ralentir le travail de l'humain dans le cas où le robot et l'humain travaillent en parallèle sur la parcelle.

La dernière inquiétude soulevée concerne l'autonomie énergétique du robot : les maraîchers ne veulent pas avoir à consommer de l'énergie pour faire fonctionner le robot, le panneau solaire doit suffire à sa navigation et son travail de désherbage. En résumant les critiques et inquiétudes des maraîchers sur l'efficacité du robot concernant sa robustesse, sa lourdeur, sa rapidité et son autonomie énergétique.

Suite aux critiques et inquiétudes énoncées, les maraîchers ont donné des idées pour rendre le robot LettuceThink plus adapté au terrain et à leurs besoins. Certaines idées répondaient directement aux inquiétudes émises plus tôt au cours de la conversation :

- le robot pouvait être pliable pour être transporté d'un site urbain à un autre ou au sein d'une exploitation maraîchère
- plusieurs bras peuvent être installés pour augmenter la rapidité de fonctionnement du robot,

³ Propos de monsieur Laurent Cnudde

⁴ Propos de monsieur Nicolas Beaufils

- pour une mise en mouvement plus rapide et pallier aux problèmes de navigation au sein de la parcelle, une version du robot pouvant être accroché à un tracteur peut être créée.

La dernière amélioration conseillée est d'installer une tête sur laquelle plusieurs outils seront installés, rendant ainsi le robot multi-tâche.

Les maraîchers ont proposé de nouvelles activités que le robot pourrait accomplir dans la ferme (selon sa structure déjà créée), le robot pourrait :

- faire du semis de précision dans les champs pour les cultures de plein champ en semis direct, il serait capable de déposer toutes les graines à la même profondeur, permettant ainsi une germination et une levée plus uniforme
- aider à la récolte et au repiquage en portant des bacs et des cagettes et en se déplaçant en suivant le travailleur,
- faire du semis de précision dans les mottes pour les plants de légumes à repiquer
- apporter une aide pour la préparation du sol pour le semis et le repiquage, il pourrait :
 - o faire du sillonage pour que les maraîchers puissent semer des lignes des graines parfaitement droites et qui simplifie ensuite le passage des outils
 - o faire du griffage du sol qui aère la couche superficielle du sol
 - o définir des empreintes pour le repiquage, ce qui assure une distance identique entre les plants repiqués et de les repiquer sur des lignes parallèles.

L'idée, lors de ces entretiens était de laisser libre cours à l'imagination des maraîchers à propos des améliorations qui pourraient être incorporées sur le robot. Toutes ces idées ne seront peut-être pas réalisables mais elles offrent de nouvelles voies de recherche pour Peter Hanappe et David Coliaux.

C) Conclusion des entretiens

Ces entretiens nous ont permis de valider la présence de ce robot désherbeur face aux besoins exprimés par les agriculteurs professionnels que nous avons rencontrés. Même s'ils utilisent des techniques ayant des résultats satisfaisants, tous ont semblé être intéressés par le robot. A la fin des entretiens, les maraîchers nous ont proposé de nous donner une petite parcelle de leur exploitation pour pouvoir mener des expériences terrain sur le robot.

Le robot pourrait être un bon moyen pour eux de faire baisser leur charge salariale, de rester compétitifs face aux grandes exploitations qui vont se lancer dans l'agriculture biologique pour répondre à la demande croissante des consommateurs et se dégager du temps. Si le désherbage est mené par le robot, les 40 % du temps libéré pourront permettre aux agriculteurs de s'occuper d'autres activités comme la commercialisation de leur produits et la communication auprès des consommateurs.

Les techniques de gestion des adventices utilisées par les maraîchers laissent un espace possible de travail au robot : les espaces de plein champ non bâchés. Selon les résultats tous les espaces sous serres sont paillés, le robot ne passera donc pas dans les zones couvertes. Il peut, en revanche, travailler dans les champs : il évitera aux maraîchers de consommer de l'essence et fera un travail de désherbage plus précis que les outils couramment utilisés. Les plantes potagères cultivées dans ces espaces ont été citées comme étant des cultures très sensibles à la concurrence des adventices. L'utilisation du robot y est d'autant plus justifiée.

Le fait que les deux maraîchers contactés qui avaient un regard critique et désapprouvateur sur la mécanisation et la robotisation de leur métier n'aient pas souhaité s'entretenir sur le sujet fausse un peu les résultats : les idées et discussions présentées ne donnent qu'un aperçu de la vision des maraîchers favorables à la présence de robot dans les exploitations agricoles. De plus, tous les maraîchers professionnels périurbains et ruraux, sauf un maraîcher normand, ont des exploitations de taille importante et tous utilisent des outils mécanisés pour travailler leurs surfaces. On peut voir cela comme un premier pied dans la robotisation.

Le panel de personnes rencontrées est assez restreint, il faudra utiliser la période automnale pour agrandir ce panel et rencontrer d'autres structures, plus petites et moins mécanisées que celles rencontrées. Les maraîchers professionnels ont déjà des techniques et un équipement qui leur permet

de gérer de manière assez efficace les adventices dans leurs parcelles. En effet, tous nous ont dit qu'ils n'ont quasiment plus de cultures à détruire car envahies par les adventices. Le problème du désherbage est que, malgré toutes les avancées techniques, il reste une activité très chronophage.

Il sera intéressant d'en rencontrer qui ont des surfaces de cultures plus restreintes et qui ont peu de pouvoir d'investissement pour étudier leurs pratiques et connaître leur avis sur le robot.

Ces entretiens offrent de nombreuses pistes à exploiter pour rendre le robot LettuceThink plus performant et plus adapté aux besoins des maraîchers et à la réalité du terrain. Certaines sont réalisables dans un futur proche, d'autres demandent de nombreuses adaptations et améliorations, voire même de changer complètement le design initial du robot. Le travail suivant sera de faire le tri dans ces propositions et d'essayer d'en appliquer un maximum tout en restant réaliste sur l'efficacité du produit final.

Dans une idée globale de diminution de l'empreinte environnementale de l'activité humaine, le robot pourrait être un moyen pour les agriculteurs de diminuer la leur. Il faudrait prendre en compte l'impact environnemental de toutes les méthodes de gestions des adventices utilisées et de les comparer avec la consommation énergétique et l'impact du robot. En effet, même si ces techniques ont prouvé leur efficacité certaines sont très coûteuses en énergie : le désherbage thermique, qu'il soit fait avec des outils de flamme directe ou d'infrarouge ou encore de projection de vapeur d'eau, utilise de manière importante du gaz et/ou de l'électricité. Les bâches plastiques, même réutilisables plusieurs années proviennent de l'industrie pétrochimique et leur recyclage est compliqué du fait de leur saleté et n'est jamais complet (GRAB, 2009). Le robot, qui fonctionnera de manière autonome du point de vue énergétique grâce au panneau solaire installé sur la structure pourra être utilisé en remplacement des bâches plastiques et des tracteurs.

IV) Pistes d'amélioration du robot suite aux expériences et aux discussions avec les maraîchers

A) Liens entre expériences sur le terrain et discussion avec les maraîchers

Un lien existe entre les résultats des expériences sur le robot LettuceThink et les résultats des discussions avec les maraîchers : ces derniers avaient anticipé un certain nombre des difficultés que nous avons par la suite rencontrées sur le terrain (robustesse, maniabilité, ...). De plus, des idées d'améliorations et de nouvelles fonctionnalités pour le robot sont apparues lors des discussions avec les maraîchers et ainsi que dans nos discussions liées à nos avancées sur le terrain.

En ce qui concerne la robustesse du robot, nous travaillons ici avec un prototype, cette toute première version du robot a permis aux chercheurs de concrétiser leur projet, cependant elle reste assez fragile. Ce robot a eu de nombreux problèmes mécaniques : le bras animé s'est plusieurs fois cassé à cause de la dureté du sol, la structure portant le bras et le moteur permettant la rotation de l'outil est sorti de ses rails à cause de chocs, les vibrations ont fragilisé le bloc portant le bras, etc. La structure du robot est en bois et rien ne protège le bloc de travail des intempéries. Le fait que le robot ne soit pas étanche a limité les périodes d'utilisation du robot. De plus, les expériences terrain ont montré que le robot n'est pas facilement déplaçable et transportable par une seule personne. Toutes ces expériences valident en quelque sorte les inquiétudes des maraîchers professionnels : certes la partie intelligence artificielle et algorithmique doit être améliorée mais la robustesse et l'ergonomie du robot ne sont pas à négliger. Les professionnels n'utiliseront pas un outil s'ils doivent faire appel à quelqu'un pour le remettre en état trop régulièrement, le robot LettuceThink doit aussi être autonome sur sa solidité et son adaptabilité aux conditions environnementales du terrain.

De nombreux maraîchers avaient des idées sur la question de l'utilisation du robot pour d'autres tâches que le désherbage. Ces idées sont apparues rapidement dans les conversations car, dans l'agriculture urbaine associative et dans l'agriculture périurbaine et rurale professionnelle, les maraîchers tendent à utiliser des pratiques qui limitent le désherbage et ils cherchent à appliquer des techniques préventives. Une seconde raison est qu'il existe d'autres tâches que les maraîchers des jardins associatifs et des exploitations professionnelles jugent ingrates et surtout chronophages.

Certaines nouvelles tâches comme le sillonnage, c'est-à-dire le travail superficiel du sol pour préparer la mise en place d'une culture se sont également présentées pendant nos observations au collège Pierre Mendès-France. D'autres, comme le semis de précision en pleine terre et dans les mottes, ne nécessitent pas une transformation profonde de la structure même du robot : la CNC et la caméra sont nécessaires pour cette tâche. Ces deux tâches pourront donc être prises en compte rapidement dans les idées d'amélioration du robot LettuceThink.

En revanche d'autres idées d'améliorations qui impliquent des changements importants dans la structure du robot : le rendre pliable, installer plusieurs bras sur la CNC pour accélérer le travail de désherbage seront plus compliquées à appliquer. De plus, certaines caractéristiques comme la robustesse, la légèreté, la rapidité, qui sont des qualités requises indispensables aux yeux des maraîchers urbains, périurbains et ruraux, sont quelque peu contradictoires dans leur application. Par exemple, la robustesse nécessite en partie d'alourdir le robot, il faudra changer les matériaux choisis en premier lieu car ils ne sont pas assez solides. Il faudra changer le bois par des matériaux étanches, les roues actuelles par des roues plus grosses et plus adaptées aux terrains accidentés des exploitations. Il faudra aussi rendre le robot plus adapté aux aspérités du sol en le stabilisant. Ces changements vont à l'encontre de la possibilité d'alléger le robot et de le rendre plus rapide car ces modifications vont alourdir la structure. Suite aux expériences et aux résultats des discussions nous avons décidé de retravailler la structure même du robot pour améliorer sa robustesse, son ergonomie et certains points mentionnés ci-dessus.

Les discussions et les visites chez les maraîchers nous ont permis de voir les outils qu'ils utilisent pour désherber et lesquels, selon eux sont les plus efficaces. Cela nous a aidé à repenser la tête située à l'extrémité du bras animé. Nous pensons y installer un outil portant des lames, qui peuvent s'enfoncer dans le sol et soulever les adventices ou simplement les couper. En effet, lors des expériences nous avons utilisé des vis pour travailler le sol et nous avons remarqué que certaines adventices n'étaient que légèrement tordues après le passage du robot et que cette action ne suffisait pas tout le temps à arrêter la croissance de l'adventice. Des lames auraient pu trancher la tige des adventices à l'endroit de la pliure. Cet outil sera inspiré de la houe maraîchère.

En conclusion les discussions et les retours des expériences nous ont permis de réfléchir à des améliorations d'un point de vue mécanique et algorithmique pour le robot. Les entretiens avec les maraîchers ont permis de valider certaines de nos idées et de changer de direction lorsque que nous pensions à des développements qui finalement ne leur étaient pas utiles sur le terrain.

Ces discussions, certes très intéressantes, importantes et fondamentales pour l'amélioration du robot ont malgré tout soulevé une question : nous étions nous adressés aux bonnes exploitations maraîchères ? En effet, toutes les exploitations maraîchères professionnelles, à l'exception d'une, sont déjà mécanisées. Ils ont investi dans des équipements classiques et leurs techniques de désherbage, qui reposent pour beaucoup sur l'utilisation du tracteur sont bien établies. De plus, en l'état actuel des choses, les surfaces de ces exploitations sont trop importantes pour que le robot puisse y fournir un travail efficace.

Il semble être pertinent de maintenant s'adresser à des exploitations plus petites ayant d'autres modes de cultures plus proches de la permaculture, de l'agriculture bio-intensive et de l'agroécologie.

B) Définition d'une nouvelle catégorie de maraîcher cible pour le robot suite aux conclusions du questionnaire

Suite aux entretiens menés auprès de maraîchers professionnels possédant des exploitations maraîchères de surface importante et déjà mécanisées, la question suivante s'est posée : est-ce que le robot LettuceThink est vraiment adapté pour ces exploitations ?

Les raisons de ce questionnement sont les suivantes :

- même si les maraîchers font du maraîchage diversifié, les planches de culture abritent la même culture avec une densité assez faible et contrôlée pour permettre aux outils mécanisés de passer dans les inter-rangs. La diversité ne se fait pas à l'échelle de la planche mais à l'échelle de l'exploitation, la densité de plantation est définie par les outils mécanisés (quand les exploitants en possèdent) lors du semis. Les pratiques culturales sont celles assez classiques d'un maraîchage intensif biologique,
- les adventices sont gérées grâce à deux grandes catégories de méthodes : le paillage et le désherbage mécanique, ce dernier est motorisé dans plus de 70% des cas. Ces techniques semblent être efficaces. La mécanisation du désherbage leur permet de travailler sur des grandes surfaces dans un temps relativement restreint et le paillage protège quasiment toutes les surfaces couvertes des exploitations,
- les exploitations professionnelles emploient beaucoup de saisonniers pendant la haute saison. Le désherbage est une des plus grosses tâches accomplies par ces saisonniers, le robot entre en concurrence avec leur travail et leur métier.

Ces résultats nous ont fait douter de l'utilité du robot LettuceThink dans ce genre d'exploitation maraîchère diversifiée classique.

Le robot pourrait peut-être être utile dans les fermes de plus petite surface moins voire pas du tout mécanisées. Ces fermes se développent sur le territoire français et ont été étudiées par Kevin Morel dans sa thèse "Viabilité des microfermes maraîchères biologiques. Une étude inductive combinant méthodes qualitatives et modélisation."

Il les définit comme “des microfermes qui répondent aux critères suivants :

- *le maraîchage est l'activité principale de création de revenu de la ferme;*
- *la surface cultivée en maraîchage est en dessous de 1,5 ha par équivalent temps plein [...]*
- *la ferme cultive plus de 30 types de légumes sur la ferme [...]*
- *les paysans se réfèrent à des sources d'inspiration alternatives comme la permaculture, le maraîchage bio-intensif ou l'agriculture naturelle et revendiquent le fait que leur stratégies répondent à des aspirations écologique et sociales fortes.”(Morel, 2016)*

Ces microfermes sont des structures d'exploitations maraîchères intéressantes pour le robot : des techniques proches de la permaculture et de l'agriculture naturelle y sont appliquées. Le robot, adapté aux techniques d'associations de culture, de fortes densités de culture, de cultures fortement diversifiées, d'écosystème complet créé au sein de la ferme, etc. pourra y être utilisé sans que le maraîcher change ses méthodes de culture. Le maraîcher travaillant souvent seul sur sa ferme, le robot pourrait lui permettre de se dégager du temps pour se consacrer à d'autres tâches que le désherbage ou même pour avoir du temps personnel.

Ces microfermes peuvent être présentes dans des milieux urbains denses, les fermes urbaines associatives rencontrées ont un fonctionnement proche de ces microfermes.

Elles remettent en cause les principes de modernisation agricole, la non-mécanisation ou la mécanisation légère est un choix plutôt qu'un fait subi causé par un problème financier.

Dans sa thèse Kevin Morel précise que les microfermes sont montées par des personnes ayant des convictions personnelles fortes qui prennent en compte l'impact environnemental et social de la ferme. Ces microfermes étaient la cible de départ lorsque le robot a été conçu mais il a été très compliqué de les contacter. En effet, peu d'entre elles font partie des réseaux agricoles classiques, elles sont implantées au niveau local mais les institutions ne les connaissent pas. J'ai réussi à avoir les contacts de quelques-unes mais nous n'avons pas réussi à trouver un moment dans leurs emplois du temps extrêmement chargés pour discuter. Ces fermes seront recontactées en automne.

Si nous arrivons à ouvrir la discussion avec les maraîchers de ces microfermes, il sera peut-être difficile mais enrichissant de montrer l'attrait que pourrait avoir un robot dans leurs fermes. Les maraîchers qui n'ont pas souhaité répondre à notre questionnaire ont mis en avant le fait que si les robots travaillaient dans les champs, la main-d'œuvre disparaîtrait et que la robotisation du métier de maraîcher aller “tuer le travail”. Il faudra les convaincre que le robot est vu comme une aide sur une microferme dans laquelle le maraîcher travaille seul de nombreuses heures et qu'il pourra lui permettre de se dégager du temps. Ici le robot ne remplacera le travail de personne, il permettra au maraîcher de travailler un peu moins ou de se concentrer sur d'autres tâches dans sa ferme.

Conclusion générale

Ce mémoire contient des éléments de réponses sur des méthodes d'évaluation du travail du robot LettuceThink et donne de nombreuses pistes d'améliorations pour le robot. Les améliorations touchent à son fonctionnement mécanique et algorithmique. Ces pistes sont aussi de nouvelles fonctionnalités qui pourraient être installées sur le robot. Ces idées ont été apportées par les conclusions tirées des expériences menées sur le robot LettuceThink et par les discussions eues avec des maraîchers professionnels.

Les conclusions principales des tests sur le robot sont les suivantes : l'idée originelle de méthode de désherbage mécanique est bonne. Les expériences nous ont prouvé que l'outil pensé par Peter Hanappe fonctionne et arrive à désherber les adventices jusqu'à ce qu'elles atteignent le stade plantule. Il faut maintenant renforcer la structure pour adapter le robot aux conditions extérieures. L'algorithme basé sur la distinction des cultures principales à travers leur couleur était une idée intéressante mais ce traitement d'images ne suffira pas. Il faudra discriminer les adventices des cultures principales via d'autres méthodes comme les différences de stades de développement entre les plantes indésirables et les cultures, les différences de phénotype, etc. Il n'y aura peut-être pas besoin d'aller jusqu'à la reconnaissance formelle de toutes les cultures et de toutes les adventices avoir un logiciel fonctionnel. Les expériences ont permis de faire des avancées importantes dans le développement du robot. L'algorithme du robot est maintenant adapté aux conditions environnementales des exploitations maraîchères. La mécanique et le design du robot doivent être repensés pour le rendre plus adapté au terrain. Ces conclusions et progrès n'ont été possibles que par les expériences terrain. Les tests faits au préalable au laboratoire ne rendaient pas compte de la complexité des conditions réelles.

L'intérêt des maraîchers professionnels pour le robot a confirmé son utilité potentielle dans les exploitations maraîchères. Pour la plupart des agriculteurs rencontrés, la robotisation est un moyen comme un autre d'être plus performant. Le robot désherbeur leur permettra de se dégager du temps à réemployer dans leur exploitation ou dans leur temps libre. De plus, ils ont tous été sensibles au fait que les plans de constructions et le logiciel de fonctionnement sont libres d'accès. Les échanges entre les professionnels du maraîchage et les chercheurs développant le robot sont un moyen idéal de le rendre plus efficace. Les besoins et les attentes réelles des professionnels sont directement pris en compte et la mise en commun des idées accélère la mise en place des améliorations. Ces entretiens nous ont offert de nombreuses possibilités auxquelles nous n'avions pas pensé, elles ont permis une accélération du processus transformant le robot en un outil multifonctionnel et attractif pour les professionnels.

Un travail complexe doit être fait suite à ce stage, il faut déterminer quelles améliorations sont les plus pertinentes, quelles sont celles qui ne pourront être incorporées au robot, quelles expériences sont à refaire et dans quelles conditions, etc. Ces expériences et discussions ont offert beaucoup de voies différentes d'évolution, il faut maintenant les hiérarchiser.

Bibliographie

AFPP Commission des essais biologiques. Répertoire terminologique en protection des plantes. 6e Édition. 2011.

AGRESTE. Les exploitations légumières, les surfaces. Dossier n°16. 2013.

BECHAR, Avital et VIGNEAULT, Clément. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 2016, vol. 149, p. 94-111.

BOURGEOIS, Lucien. Soixante ans de politique agricole en France. Un volontarisme politique dans un contexte favorable. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, 2007, no 300, p. 35-41.

BROHAN, Gaëla, BUCHMANN, Willy, LAÏLLE, Pauline, *et al.* Activité de désherbage. Etude des risques et l'organisation du travail. Préconisations. Compamed Santé, 2015. Rapport final.

CAUSSANEL, J. P. Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle : situation de concurrence bispécifique. *Agronomie*, 1989, vol. 9, no 3, p. 219-240.

COLLIAUX, David et HANAPPE Peter. LettuceThink: A open and versatile robotic platform for weeding and crop monitoring on microfarms. EFITA WCCA 2017 Conférence, Montpellier Supagro, Montpellier, France, July 2-6, 2017.

DANIEL, Anne-Cécile. Fonctionnement et durabilité des microfermes urbaines. Une étude participative sur le cas des fermes franciliennes. 2017.

DELLENBACH, Pierre et LEGROS, Jean-Paul. Données historiques sur le développement du machinisme agricole en France. *Notes Acad. Sci. Lett. Montpellier*, 2001, vol. 3763, p. 16.

ECOPHYTOPIC. Méthodes alternatives de gestion des adventices. FOCUS n°3. 2013

EUROPÉENNE, Communauté. Règlement (CE) No 834/2007 du Conseil du 28 juin 2007 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CEE) no 2092/91. *JO L*, 2007, vol. 189.

GAUCHE, Agnès, PRÉVOST, Benoît, TOUZARD, Jean-Marc, *et al.* Elaboration d'un référentiel technico-économique dans le domaine des circuits courts de commercialisation. Partie 3: Exploitations maraîchères en circuits courts: diversité des modèles et approche des performances. 2011.

GONZALEZ-DE-SOTO, Mariano, EMMI, Luis, BENAVIDES, Carmen, *et al.* Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture. *Biosystems Engineering*, 2016, vol. 143, p. 79-94.

GRARD, Baptiste Jean-Paul, BEL, Nicolas, MARCHAL, Nicolas, *et al.* Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 2015, vol. 3, no 1, p. 21-34.

GUÉGAN, Sacha et LÉGER, François. *Maraîchage biologique permaculturel et performance économique*. 2015. Thèse de doctorat. INRA.

HUAT, Joël et TOURÉ, Amadou. Contrôle agro-écologique des adventices dans les systèmes intégrés riz-maraîchage en zones de bas-fonds au Bénin. 2009.

INPACT (Initiatives pour une Agriculture Citoyenne et Territoriale). Souveraineté technologique des paysans. Défendre l'intérêt général autour des agroéquipements. 2016

KIENZLE, J. et SIMS, B. Farm power and mechanization for small farms in sub-Saharan Africa. *Food and agriculture organization of the United Nations Rome*, 2006.

LICHTENHAHN, Martin, KOLLER, Martin, DIERAUER, Hansueli, *et al.* Le contrôle des adventices en maraîchage biologique. 2002.

MAZOLLIER, Catherine. Les paillages biodégradables en maraîchage biologique : produits et normalisation. 2009.

MAZOLLIER, Catherine, ERNOUT, Henri. *et al.* Désherbage alternatif en maraîchage. 2ème partie : Paillage et matériel de désherbage. 2015

MINETTE, S. *Caractéristiques des principales cultures intermédiaires*. Tech. rep., Région Poitou-Charentes, Chambre d'agriculture Poitou-Charentes, 2009.

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. Qu'est-ce que l'agriculture biologique?. Consulté le 8/08/2017. Disponible à cette adresse suivante : <http://agriculture.gouv.fr/lagriculture-biologique-1>

MOREL, Kevin. *Viabilité des microfermes maraîchères biologiques. Une étude inductive combinant méthodes qualitatives et modélisation*. 2016. Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay.

NAÏO TECHNOLOGIES. Robotique au service de l'agriculture. Consulté le 11/08/2017. Disponible à l'adresse suivante : <http://www.naio-technologies.com/>

OERKE, E.-C. et DEHNE, H.-W. Safeguarding production—losses in major crops and the role of crop protection. *Crop protection*, 2004, vol. 23, no 4, p. 275-285.

P2P FoodLab. Weeding Robot. Consulté le 02/09/2017. Disponible à l'adresse suivante : https://p2pfoodlab.net/wiki/index.php/Weeding_Robot

PRAT, Roger et RUBINSTEIN, Jean-Pierre. Structure et croissance de la racine. 12-Le système racinaire. Consulté le 12/04/2017. Disponible à l'adresse suivante : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/racine/12-racines.htm>

RODRIGUEZ, Alain et GASQUEZ, Jacques. RMT «Gestion de la flore adventice en grandes cultures». *Innovations agronomiques*, 2008, vol. 3, p. p107-120.

The Open Source Initiative. The Open Source Definition. Consulté le 21/06/2017. Disponible à l'adresse suivante : <https://opensource.org/osd>.

TREMBLAY, Nicolas, FALLON, Edith, et ZIADI, Noura. Sensing of crop nitrogen status: Opportunities, tools, limitations, and supporting information requirements. *HortTechnology*, 2011, vol. 21, no 3, p. 274-281.

VALANTIN-MORISON, M., GUICHARD, L., et JEUFFROY, M. H. Comment maîtriser la flore adventice des grandes cultures à travers les éléments de l'itinéraire technique. *Innovations agronomiques*, 2008, vol. 3, p. 27-41.

VALL, Eric, CATHALA, Magalie, MARNOTTE, Roland, *et al.* Pourquoi inciter les agriculteurs à innover dans les techniques de désherbage? Etat de la pratique et propositions de la recherche. In :

Savanes africaines: des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua, Cameroun. Cirad-Prasac, 2003. p. 16 p.

VIDONI, Renato, BIETRESATO, Marco, GASPARETTO, Alessandro, *et al.* Evaluation and stability comparison of different vehicle configurations for robotic agricultural operations on side-slopes. *Biosystems engineering*, 2015, vol. 129, p. 197-211.

WILSON, J. N. Guidance of agricultural vehicles—a historical perspective. *Computers and electronics in agriculture*, 2000, vol. 25, no 1, p. 3-9.

ZWAENEPOEL, Philippe et LE BARS, Jean-Michel. L'agriculture de précision. *Ingénieries-EAT*, 1997, no 12, p. 67-p. 79.

Liste des contacts

Nom	Entreprise/ Association	Métier	Mail	Commentaires
Coulon Audrey	Chambre d'agriculture d'Ile-de- France	Conseillère en maraîchage biologique	a.coulon@ile-de-france.chambagri.fr	Discussion autour d'un partenariat avec la chambre d'agriculture
Guespin Juliette	GAB IdF	Conseillère animatrice en maraîchage biologique	j.guespin@bioiledefrance.fr	Aide dans la prise de contact avec des maraîchers
Guiomar Xavier	AgroParisTech	Enseignant	xavier.guiomar@agroparistech.fr	Aide dans la prise de contact avec GAB IdF et maraîchers
Grard Baptiste	AgroParisTech	Doctorant	baptiste.grad@agroparistech.com	Aide pour la création des protocoles expérimentaux
Magali	Kelbongoo	Responsable relations producteurs	producteurs@kelbongoo.fr	Aide dans la prise de contact avec des maraîchers
Orus Camille	Chambre d'agriculture d'Ile-de- France	Chargée de mission innovation	c.orus@cra-idf.chambagri.fr	Discussion autour d'un partenariat avec la chambre d'agriculture
Ronceray Simon	Veni Verdi	Salarié	simon.ronceray@gmail.com	Lien avec le collège et l'association et aide pour la mise en place des expériences

Liste des fournisseurs

Entreprise	Fournisseur	Contact	Site WEB
Bio Yvelines Services	Compost de déchets verts	bioprurier@orange.fr	www.bioyvelines.fr
La boîte à champignons	Marc de café mycélisé	gregoire@laboiteachampignons.com	www.laboiteachampignons.com
La ferme Sainte Marthe	Graines		www.fermedesaintemarthe.com
Union Bois	Bois	union.bio@orange.fr	union-bois.fr

Annexes

Fiches des maraîchers rencontrés

Beaufils Nicolas Les jardins du Priape, 16 Hameau de Cruaux, 02220 Chéry-Chartreuve Maraîcher professionnel			
Âge	35	Pas de formation agricole	Reconversion
Année d'installation	2008	Installation nouvelle hors cadre familial	
Surfaces Total	4 ha	Label AB	
Nombre d'employés	Permanents	1	
	Saisonniers	5	
	Stagiaires		
Organisation spatiale des planches	Planches de 1,5 m de largeur (adaptées aux tracteurs)		
Production	Légumes classiques de maraîchage		
Mode de commercialisation	AMAP		
	Vente directe via Internet		
	Magasin de producteurs		
Suivi du développement des adventices	Oui, au moment du tour de son exploitation		
Temps estimé passé au désherbage	3 jours par semaine		
Techniques de gestion des adventices	- Paillage avec bâches plastiques		
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles	Amarante, chénopode	
	Pérennes	Liseron, rumex, prêle	
Outils de désherbage utilisés	Motorisés	Tracteur avec bineuse et herse étrille	
	Non motorisés	Bineuse et désherbage manuel	
Avis sur la robotisation de leur métier	- Favorable à la présence de robot dans les exploitations maraîchères - Intéressé uniquement si preuve de l'efficacité du robot et de la qualité du travail fourni - Intéressé par l'autonomie du robot		
Problèmes liés à l'utilisation du robot	- Besoin d'un robot résistant aux conditions extérieures (pluie, rouille, poussière) - Robot trop lent pour être efficace si le désherbage est fait grâce à des vibrations et ne doit pas ralentir le travail des humains		
Idées d'amélioration du robot	- Alourdir le robot pour lui permettre de se déplacer dans toute l'exploitation		
Nouvelles tâches exécutables par le robot	-Tâches très chronophages comme l'entretien des plants de tomates		

Bénil Clément Villepreux Maraîcher professionnel			
Âge	28 ans	Bac technique agricole	Pas de reconversion
Année d'installation	2017	Installation nouvelle	
Surfaces Total	5 ha	En cours de certification AB	
Nombre d'employés	Permanents	1 mi-temps	
	Saisonniers		
	Stagiaires		
Organisation spatiale des planches	Planches permanentes de 1,2m de large et de 30 cm de passe-pieds		
Production	Légumes classiques de maraîchage		
Mode de commercialisation	AMAP		
Suivi du développement des adventices	Non		
Temps estimé passé au désherbage			
Techniques de gestion des adventices	-Faux semis -Paillage des plantes repiquées -Désherbage thermique		
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles		
	Pérennes		
Outils de désherbage utilisés	Motorisés		
	Non motorisés	Traction animale avec cheval	
Avis sur la robotisation de leur métier	- Contre la robotisation et la déshumanisation du travail - Coûts d'achat trop importants d'après les prix du marché actuel		
Problèmes liés à l'utilisation du robot	- Doit être adapté au travail du cheval		
Idées d'amélioration du robot			
Nouvelles tâches exécutables par le robot	- Pourrait porter des caisses pour aider à la récolte et au repiquage		

Laurent Cnudde La ferme du Chassy, 7 rue Saint-Pierre, 60120 Esquennoy Maraîcher professionnel		
Âge	43 ans	Ingénieur Agronome
Année d'installation	1997	Reprise de l'exploitation dans le cadre familial
Surfaces Total	135 ha dont 10 ha de maraîchage	En cours de labellisation AB et n'a jamais traité avant
Nombre d'employés	Permanents	1 et 2/3
	Saisonniers	6
	Stagiaires	
Organisation spatiale des planches	1 m et 1,2 m pour les planches bâchées 1,5 m pour les planches de plein champ	
Production	Légumes classiques de maraîchage et fraises	
Mode de commercialisation	Vente directe via Internet	
	Magasin à la ferme	
Suivi du développement des adventices	Oui, au moment du tour de son exploitation	
Temps estimé passé au désherbage	3 jours par semaine	
Techniques de gestion des adventices	- Faux-semis dans les champs - Désherbage thermique dans les champs - Paillage avec bâches plastiques	
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles	
	Pérennes	Rumex, chardon
Outils de désherbage utilisés	Motorisés	Tracteur avec bineuse et bed weeder
	Non motorisés	Binette et désherbage manuel
Avis sur la robotisation de leur métier	- Le désherbage est une tâche pénible et la main-d'œuvre est le premier coût financier pour une petite exploitation donc en faveur de la robotisation de cette tâche - Permet aux petites exploitations en AB de rester concurrentes face aux exploitations industrielles qui se lancent dans l'AB avec un parc robotique beaucoup plus important	
Problèmes liés à l'utilisation du robot		
Idées d'amélioration du robot		
Nouvelles tâches exécutables par le robot		

Olivier Halluin Rue du Saule trapu, Drive Fermier, 01300 Massy Maraîcher professionnel		
Âge	32 ans	Ingénieur agronome
Année d'installation	2915	Reprise de l'exploitation dans un cadre familial
Surfaces Total	85 ha	Label AB
Nombre d'employés	Permanents	3
	Saisonniers	70 avec la CUMA dont il fait parti
	Stagiaires	
Organisation spatiale des planches	Planches de 1,2 m (adaptées aux tracteurs) Petites buttes de 75 cm	
Production	10 variétés de légumes plein champs	
Mode de commercialisation	Vente directe via Internet	
	Vente à une coopérative	
Suivi du développement des adventices	Suivi écrit par culture	
Temps estimé passé au désherbage	Dans la période d'entretien des cultures (printemps-été) près de 75% du temps	
Techniques de gestion des adventices	- Faux-semis - Désherbage thermique	
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles	Chénopode, renouée, morelle
	Pérennes	Chardon, laiteron, lupin, matricaire
Outils de désherbage utilisés	Motorisés	Tracteurs avec bineuse et bed weeder
	Non motorisés	Bineuse et désherbage manuel
Avis sur la robotisation de leur métier	- Favorable à la présence de robot dans les exploitations maraîchères - Intéressé par la capacité du robot à désherber entre les plants et pas seulement dans les inter-rangs	
Problèmes liés à l'utilisation du robot	- Robot trop lent pour la courte période propice au désherbage	
Idées d'amélioration du robot	- Installer plusieurs bras sur la structure pour accélérer le travail du robot - Acheter une licence GPS peu chère et peu précise pour permettre au robot de se déplacer dans l'exploitation et gérer les mouvements plus précis grâce au traitement d'images	
Nouvelles tâches exécutables par le robot	- Repiquage	

Lucie Humbaire La REcyclerie, 83 boulevard Ornano, 75019 Paris Salariée de l'association Les Amis de la Recyclerie		
Âge	26 ans	Ingénieur agronome
Année d'installation	2015	Installation nouvelle
Surfaces Total	4000 m²	Pas de labellisation et pas de traitements phytosanitaires
Nombre d'employés	Permanents	1
	Saisonniers	
	Stagiaires	
Organisation spatiale des planches	Planches permanentes de 1,2 m de largeur	
Production	Légumes classiques de maraîchage	
Mode de commercialisation	Vente directe au restaurant lié à la ferme urbaine	
	Dons aux bénévoles de l'association	
Suivi du développement des adventices	Non	
Temps estimé passé au désherbage	Quasiment pas de désherbage car mise en place de techniques préventives efficaces sur ses parcelles	
Techniques de gestion des adventices	- Paillage organique avec paille et copeaux de bois	
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles	
	Pérennes	
Outils de désherbage utilisés	Motorisés	
	Non motorisés	Désherbage manuel
Avis sur la robotisation de leur métier	- Intéressée car juge que les robots peuvent apporter une aide importante aux maraîchers	
Problèmes liés à l'utilisation du robot	- Ici robot trop grand pour les surfaces cultivées	
Idées d'amélioration du robot		
Nouvelles tâches exécutables par le robot	- Récolte des fruits des arbres fruitiers	

Erwan Humbert Ferme des prés neufs, 90 rue des Villiers, 91310 Longpont-sur-orge Maraîcher professionnel			
Âge	44 ans	Formation BPREA	Reconversion Ancien ingénieur électronique
Année d'installation	2012	Installation nouvelle hors cadre familial	
Surfaces Total	4 ha	Label AB	
Nombre d'employés	Permanents	1	
	Saisonniers	1	
	Stagiaires	1	
Organisation spatiale des planches	Planches permanentes de 1,4 m (adaptées aux tracteurs)		
Production	Légumes classiques de maraîchage		
Transformation	Produits	Tous les légumes	
	Lieu	Cuisine participative dans la ferme pour les AMAPiens	
Mode de commercialisation	AMAP		
	Vente à un restaurateur		
Suivi du développement des adventices	Oui, au moment du tour de son exploitation		
Temps estimé passé au désherbage	3 jours par semaine		
Techniques de gestion des adventices	- Faux-semis - Paillage avec bâches plastiques et biodégradables		
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles		
	Pérennes	Liseron, chiendent, chardon, rumex	
Outils de désherbage utilisés	Motorisés	Tracteur avec herse étrille	
	Non motorisés	Binette, fourche et désherbage manuel	
Avis sur la robotisation de leur métier	- Intéressé par la robotisation car permet de gagner du temps		
Problèmes liés à l'utilisation du robot	- Doit être plus rapide que l'humain - Doit être assez robuste pour se déplacer dans toute l'exploitation		
Idées d'amélioration du robot	- Robot pliable et transportable dans une brouette pour faciliter les déplacements dans l'exploitation		
Nouvelles tâches exécutables par le robot	- Semis de précision dans les mottes et dans les champs - Sillonage avant semis et repiquage - Dessin de l'empreinte pour faciliter le repiquage - Aspirateur à doryphores		

Nadine Lahoud Veni Verdi (4 sites dans Paris) Fondatrice de l'association d'agriculture urbaine Veni Verdi			
Âge	45 ans	Pas de formation agricole	Reconversion
Année d'installation	Création de l'association en 2010		
Surfaces Total	6500 m²	Pas de labellisation et pas de traitements phytosanitaires	
Nombre d'employés	Permanents	3	
	Saisonniers	2 services civiques	
	Stagiaires	3	
Organisation spatiale des planches	- planches permanentes de 80 cm et 1m de largeur selon les sites - petits bacs et grands sacs		
Production	Légumes classiques de maraîchage		
Mode de commercialisation	Vente directe		
	Vente à un restaurateur		
	Dons aux bénévoles de l'association		
Suivi du développement des adventices	Non		
Temps estimé passé au désherbage			
Techniques de gestion des adventices	- Désherbage manuel sur tous les sites : 3 des 4 sites sont des en hors sol avec les cultures installées dans de la terre apportée qui contient très peu de graines d'adventices donc ces sites ne nécessitent pas beaucoup de désherbage		
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles		
	Pérennes		
Outils de désherbage utilisés	Motorisés		
	Non motorisés		
Avis sur la robotisation de leur métier	- Intéressée uniquement si preuve d'un véritable gain de temps par rapport aux techniques existantes		
Problèmes liés à l'utilisation du robot	- Robot trop lourd et volumineux pour être transporté entre tous les sites de l'association - Doit être performant et assurer un gain de temps		
Idées d'amélioration du robot	- Robot pliable pour être transporté - Version du robot plus petite pour intéresser les agriculteurs urbains		
Nouvelles tâches exécutables par le robot	- Semis de précision - Repiquage - Sillonage		

Romain Luchard Le potager de la Guillerie, 61700 Domfront en Poirais Maraîcher professionnel			
Âge	23 ans	Bac professionnel en gestion des espaces verts	Reconversion
Année d'installation	2014	Installation nouvelle hors cadre familial	
Surfaces Total	1,5 ha	Label Nature & Progrès	
Nombre d'employés	Permanents		
	Saisonniers		
	Stagiaires		
Organisation spatiale des planches	Planches permanentes de 80 cm de largeur		
Production	Légumes classiques de maraîchage		
Mode de commercialisation	AMAP		
	Vente directe via Internet		
Suivi du développement des adventices	Oui, au moment du tour de son exploitation		
Temps estimé passé au désherbage			
Techniques de gestion des adventices	- Technique de culture bio-intensive : utilise la densité de plantation pour étouffer les adventices - Paillage plastique mais essaie d'arrêter d'utiliser cette technique		
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles		
	Pérennes	Rumex, laitron, renoncule	
Outils de désherbage utilisés	Motorisés	Non	
	Non motorisés	Binette et désherbage manuel	
Avis sur la robotisation de leur métier	- Pense que les robots peuvent être utiles dans les plus grandes exploitations que la sienne - Intéressé plus par la philosophie low-tech		
Problèmes liés à l'utilisation du robot	- Peu adapté aux conditions extérieures		
Idées d'amélioration du robot			
Nouvelles tâches exécutables par le robot	-Repiquage - Semis de précision pour les cultures de plein champ ayant des petites graines		

Shizu Okada Pépinières Chatelain, 50 route de Roissy, 95500 Le Thillay Salariée de la pépinière			
Âge	35 ans	Ingénieure agronome	Reconversion
Année d'installation	2016	Installation nouvelle	
Surfaces Total	6000 m²	En cours de certification AB	
Nombre d'employés	Permanents	1 mi-temps	
	Saisonniers		
	Stagiaires		
Organisation spatiale des planches	Planches permanentes de 1 m de largeur		
Production	Légumes classiques de maraîchage		
Mode de commercialisation	Magasin à la ferme		
	Vente à un restaurateur		
Suivi du développement des adventices	Oui, au moment du tour de son exploitation		
Temps estimé passé au désherbage	3 jours par semaine		
Techniques de gestion des adventices	-Paillage avec bâches plastiques - Rotations de cultures		
Adventices présentes sur l'exploitation	Annuelles	Panic	
	Pérennes		
Outils de désherbage utilisés	Motorisés		
	Non motorisés	Bineuse	
Avis sur la robotisation de leur métier	- Favorable à la présence de robot dans les exploitations maraîchères car estime que le maraîchage est un métier extrêmement difficile - Intéressé par l'autonomie du robot - Existe peu de techniques de contrôle des adventices en comparaison avec les autres ravageurs		
Problèmes liés à l'utilisation du robot	- Besoin que le robot soit adapté aux différents stades de développement des adventices		
Idées d'amélioration du robot	- Installer une tête qui permet de changer d'outils pour faire d'autres tâches		
Nouvelles tâches exécutables par le robot			

Abstract

Weeding is a key issue in organic agriculture, especially in the organic market gardening agriculture. Farmers are not allowed to use chemical solutions to take out the weeds, they can only use mechanical and thermic solutions in their exploitations. Farmers say that the weeding process is one the most time-consuming task in the maintenance job. Weeding causes physical pain to the farmers, is labor intensive and is considered a very tedious task. A solution to this problem would be to set robots in farms to do the weeding part. Robots could weed by using technics respectful of the rules of the organic agriculture. Peter Hanappe and David Coliaux, researchers at the Sony CSL laboratory are creating a robot, called LettuceThink, that can weed beds of market gardening cultures. This robot can determine the location of the vegetable and weed around the plant thanks to an animated arm.

In this dissertation are presented the results of experiments created to put to test the efficiency of the robot. Efficiency is here defined as the ability of the robot to weed in the real conditions of use. Those conditions include the diversity of weeds existing in a market gardening farm, the diversity of cultivated plants and of weather conditions. In the second part of this dissertation, I present the results of discussion that I had with market gardening farmers. The two major subjects of the discussions were their technics of weed management and the possible interest of the robot LettuceThink in their farm. The aim of these talks was to understand the need of professional market gardeners in terms of robotization and to figure out how the robot will be able to meet this need.

The experiments and the discussions enabled us to find important ideas to improve the robot in terms of mechanics and algorithmic.

Key-words: agricultural robotics, market gardening, organic agriculture, technology

Résumé

Le désherbage est un problème important de l'agriculture biologique, surtout dans le maraîchage biologique. Les agriculteurs n'utilisent pas de produits phytosanitaires pour désherber et doivent gérer la présence des adventices uniquement avec des techniques mécaniques, thermiques et manuelles. Cette activité est la plus chronophage de toutes les activités d'entretien. Elle est considérée comme fastidieuse, cause de problèmes de santé aux maraîchers et est très couteuse en main-d'œuvre. Une des solutions à ce problème est d'installer des robots désherbeurs au sein des parcelles qui utilisent des techniques respectueuses des contraintes de l'agriculture biologique. Peter Hanappe et David Coliaux, chercheurs au laboratoire Sony CSL travaillent sur un robot désherbeur, appelé LettuceThink, capable de désherber des planches de cultures maraîchères. Ce robot est capable de détecter la position des cultures et désherbe autour de manière mécanique grâce à un bras animé.

Dans ce mémoire sont présentés dans un premier temps des résultats d'expériences testant l'efficacité du robot. L'efficacité a été définie ici comme la capacité du robot à désherber dans les conditions réelles d'utilisation avec une grande diversité d'adventices, de plantes cultivées et de conditions environnementales. La deuxième partie du mémoire se concentre sur les résultats de discussions menées avec des maraîchers portant sur leurs techniques de désherbage et la potentielle utilité du robot dans leur exploitations. Le but des discussions était de connaître les besoins des maraîchers dans le domaine de la robotique et de comprendre comment le robot peut y répondre.

Les conclusions tirées de ces expériences et discussions ont permis de mettre en place des pistes d'améliorations pour le robot d'un point de vue mécanique et algorithmique.

Mots clés : agriculture biologique, maraîchage, robotique agricole, technologie