



HAL
open science

Optimisation d'une plateforme de phénotypage pour l'utilisation de capteurs

B. Benet, C. Dubos

► **To cite this version:**

B. Benet, C. Dubos. Optimisation d'une plateforme de phénotypage pour l'utilisation de capteurs. irstea. 2018, pp.10. hal-02608440

HAL Id: hal-02608440

<https://hal.inrae.fr/hal-02608440v1>

Submitted on 16 May 2020

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.

Projet Casdar Phénaufol

Travaux réalisés dans l'Action 2 (année 2017)

Optimisation d'une plateforme de phénotypage pour l'utilisation de capteurs

Irstea – Clermont-Ferrand
Bernard BENET – Camille DUBOS
10 Mars 2018

Introduction

Au cours de la première année du projet Casdar Phénaufol, les activités menées au sein de l'équipe ROMEA du centre Irstea de Clermont-Ferrand, ont porté sur l'action 2, en s'intéressant d'une part à la plateforme robotisée retenue pour les opérations de phénotypage qui a été livrée par la Société Robotnik au mois de Mai 2017 et d'autre part aux techniques de vision artificielle permettant de réaliser différentes mesures sur les plants de betteraves.

Une étude de faisabilité, préalable au projet Phénaufol, relative au développement d'un système robotisé destiné à réaliser des mesures par vision artificielle pour la détection de maladies sur des feuilles de betteraves et l'étude de leur propagation dans les cultures, a été réalisée en 2016. Cette étude a abouti au choix du système robotisé nommé BettyBot retenu pour le projet Phénaufol.

1 - Le robot Bettybot

La figure 1 ci-dessous présente le choix retenu concernant le système robotisé et la méthode de travail permettant l'acquisition de données sur des parcelles de betteraves sucrières pour réaliser des mesures de phénotypage, à différents stades de levée. Le système robotisé attelé à un tracteur est présenté sur la figure 2.

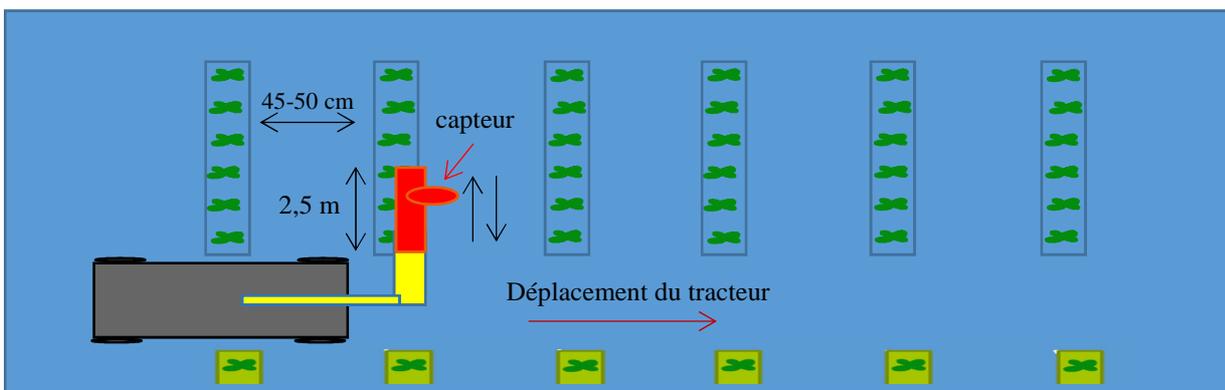


Figure 1 - Solution robotisée retenue pour le phénotypage

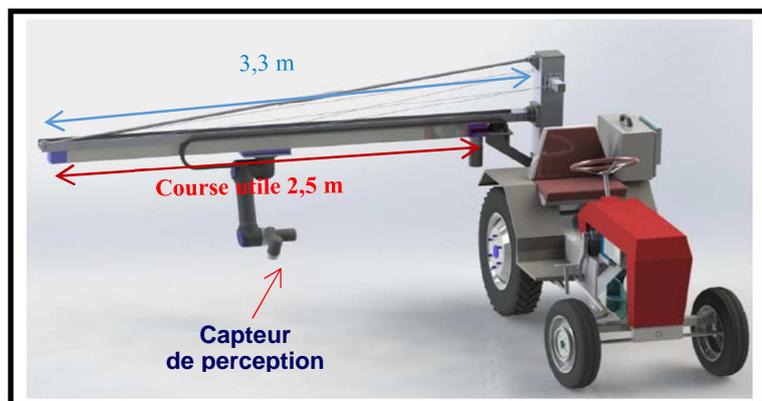


Figure 2 - Le système robotisé attelé à un micro-tracteur et le choix des capteurs



Caméra couleur



Caméra hyperspectrale

Le robot bettybot développé par la société Robotnik (Valencia-Espagne) comprend un axe linéaire motorisé, sur lequel est accroché un bras manipulateur à 6 degrés de liberté (modèle UR5 Universal Robots), permettant de positionner le capteur caméra dans des positions et orientations désirées par rapport aux feuilles de betteraves pour réaliser des mesures précises, et un support portant l'axe linéaire (figure 3).



Figure 3 - Le système robotisé Bettybot

2 - Expérimentations

Des expérimentations d'acquisition et de traitement d'images ont été réalisées en 2017, en utilisant deux plateformes robotisées. Un robot mobile nommé Jaguar a été utilisé pour des stades de croissance faibles (entre 2 et 8 feuilles), et le robot Bettybot a permis de réaliser des mesures sur des plantes de croissance élevée (figure 4).



Figure 4 - Le robot mobile Jaguar et le système robotisé Bettybot

La figure 5 présente deux exemples d'images acquises avec les deux robots.



Image acquise avec robot Jaguar



Image acquise avec robot Bettybot

Figure 5 - Acquisition d'images avec les deux robots

3 - Détection des plants par traitement d'image

Une classification des pixels de couleur Rouge Vert et Bleu, a été effectuée, dans le but de discriminer dans l'espace colorimétrique (figure 6), les pixels appartenant aux feuilles de betteraves par rapport aux autres pixels appartenant au terrain de couleur marron, gris, ...

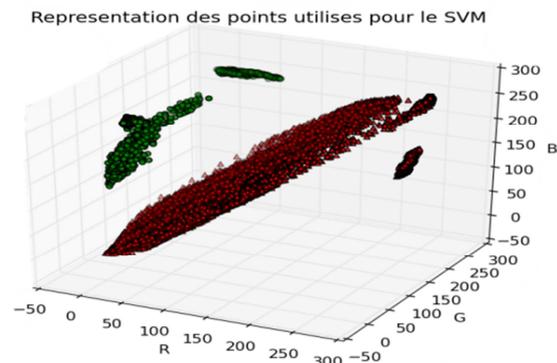


Figure 6 - Discrimination points betterave / points sol

La figure 7 présente des exemples de résultats de détection des feuilles de betteraves, par traitement d'image (opération de classification SVM, opérations de morphologie pour supprimer les bruits parasites, extraction des contours), en considérant des images acquises avec les deux systèmes robotisés.

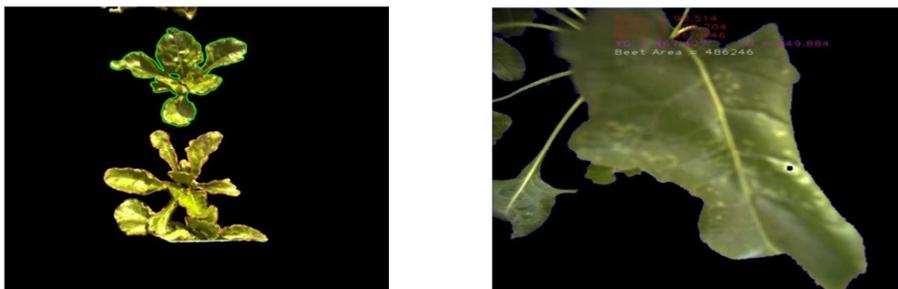


Figure 7 – Détection des feuilles de betteraves

4 - Utilisation du robot Jaguar

4-1 Présentation du système

Celui-ci était équipé de deux caméras (figure 8), une première de type webcam, en position oblique, permettait de visualiser 3 lignes de betteraves et une deuxième de type Gigaethernet, en position verticale, visualisait la raie centrale. Des algorithmes de traitement d'image ont été développés pour d'une part suivre de façon autonome les lignes de cultures (le robot enjambait la raie centrale sur la longueur de la parcelle) et d'autre part pour enregistrer des images de la raie centrale, ce qui permettait ainsi d'obtenir en temps réel, à la fin du parcours de la parcelle, la cartographie 2D de la raie centrale et réaliser alors, en temps réel, des mesures géométriques (comptage, espacement entre les plants, surface foliaire,...) et colorimétriques (niveau de rouge, vert et bleu moyen, présence de zones noires dans les feuilles,...). Ces opérations de suivi de lignes, d'enregistrement d'images et de mesures sur la raie centrale était effectuées en parallèle, en temps réel, dans le même logiciel développé.



Tests et expérimentations en laboratoire et sur des parcelles de betteraves (Montoldre) avec deux caméras :

- Caméra USB (suivi de lignes)
- Caméra GigaEthernet (mesures géométriques et colorimétriques, cartographie 2D)

Figure 8 - Le robot Jaguar avec ses deux caméras embarquées

4-2 Suivi de lignes de betteraves

Pour réaliser un suivi autonome des lignes de betteraves, un modèle géométrique du robot a été défini, en prenant en compte la position de la caméra webcam sur le robot ainsi que la géométrie du terrain (figure 9).

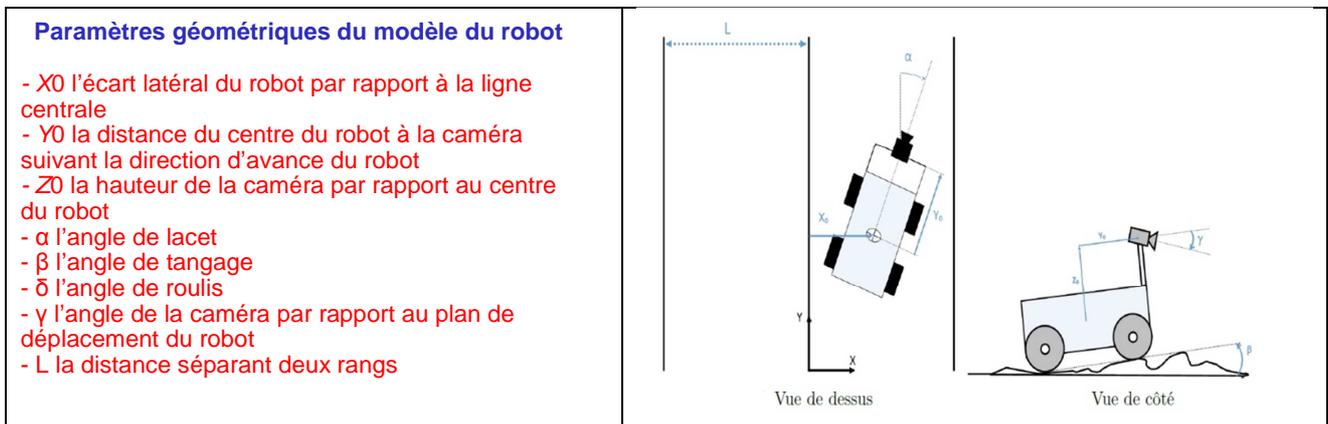


Figure 9 - Modèle géométrique du robot Jaguar pour le suivi de lignes de betteraves

La méthode utilisée pour détecter les lignes par vision consistait dans un premier temps à détecter les différentes feuilles de betteraves sur les raies de betteraves visibles par la caméra. Ensuite, une décomposition de l'image en zones rectangulaires permettait de déterminer la position des centres de gravité des feuilles de betteraves dans chacune d'elles. A partir de ces points, on pouvait ainsi obtenir des lignes par régression linéaire. On pouvait alors envoyer une commande au robot pour suivre la raie centrale (figure 10).

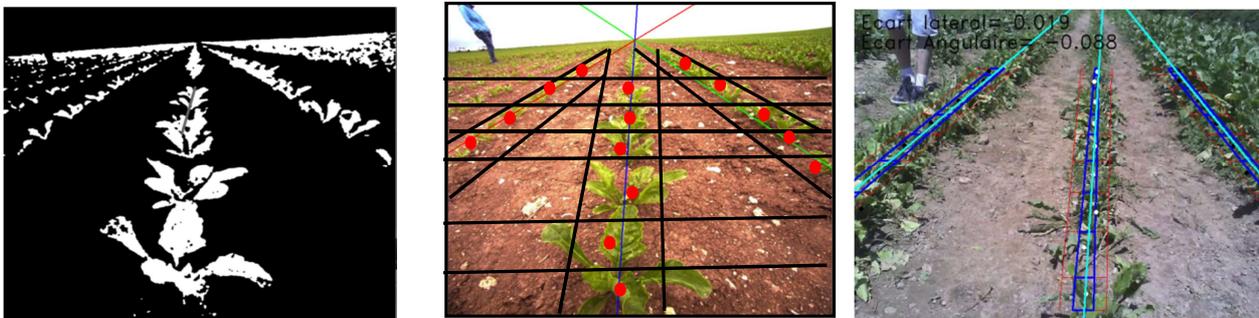


Figure 10 - Résultat de suivi de lignes des betteraves avec la caméra Webcam

4-3 Cartographie 2D

Avec la caméra GigaEthernet, l'objectif était d'acquérir des images sur la raie centrale, pour obtenir, après traitement d'image, une image cartographique. À partir de cette image cartographique, on peut réaliser des mesures géométriques, telles que le comptage des plants et des feuilles, l'espacement entre les plants, la surface foliaire, mais aussi des mesures colorimétriques, permettant d'analyser en détail les variations colorimétriques sur les différentes feuilles (figure 11).



Figure 11 - Cartographie d'une raie de betterave avec la caméra GigaEthernet

5 - Utilisation de Bettybot

5-1 Présentation du système

A l'extrémité du bras manipulateur de Bettybot, une caméra GigaEthernet a été fixée, mais une caméra de type hyperspectrale sera également disposée sur ce bras. Ce qui permettra de réaliser des mesures de phénotypage (détection des maladies) en travaillant dans différentes bandes spectrales.



Caméra GigaEthernet

Figure 12 - Le robot Bettybot avec la caméra GigaEthernet

L'utilisation d'un tel système permet d'observer les feuilles de betteraves selon différents points de vue, grâce au bras manipulateur qui permet au capteur d'atteindre un grand nombre de positions et d'orientations. De plus, l'ajout d'un axe linéaire augmente l'espace de travail du système, en permettant de déplacer le bras manipulateur en translation, et donc de traiter différentes plantes les unes à côté des autres.

Mais cette association induit des difficultés au niveau de la commande. En effet, ce système est redondant, c'est-à-dire qu'il possède plus de variables de commande (degrés de liberté) que des données de position du capteur. Ici, notre système possède 7 articulations, donc 7 variables de commandes sur lesquelles on peut agir, pour placer le capteur à une pose (position et orientation) définie par 6 valeurs (3 pour la position et 3 pour l'orientation). Il existe alors une infinité de configurations du système pour placer le capteur dans une pose désirée.

5.2 Fonctionnement général du système

Des algorithmes de contrôle/commande ont été développés pour cette opération, en agissant sur les 6 degrés de liberté du bras UR5 et en prenant en compte les problèmes de redondance, un point donné de l'environnement autour de la plante pouvant être atteint par le robot, en jouant sur différentes positions des axes du bras UR5. L'intérêt de la plateforme de phénotypage est que son comportement s'adapte en fonction de la perception de l'état de la végétation.

Ainsi, les déplacements du système doivent être asservis à partir d'algorithmes d'observation des plants de betteraves, afin de garantir une détection des maladies la plus précise possible. Il faut également prendre en compte les spécificités liées à l'évolution en milieux naturels dans ces contrôles, telles que la variation de la luminosité, pour adapter le comportement du robot. La tâche principale à effectuer est de détecter les feuilles de betteraves puis de venir les observer à l'aide du capteur situé au bout du bras manipulateur, dans le but de détecter les maladies. On peut décomposer cette tâche en différentes fonctions : la première va être de détecter les différentes feuilles à observer, ensuite de se positionner au-dessus suffisamment près, puis de se déplacer autour afin de déterminer l'angle de vue permettant d'obtenir le maximum d'informations pertinentes servant à la détection des maladies. Le travail effectué jusqu'à maintenant porte donc sur deux axes : la perception, au travers de la détection des plantes, et la commande, comprenant, entre autres, la gestion de la redondance du système.

5-3 Perception des feuilles de betteraves

Un travail de traitement d'image a été effectué. L'objectif était de détecter les feuilles de betteraves d'une plante en pot, de façon globale et de réaliser des mesures sur cet ensemble de pixels appartenant aux feuilles de points betteraves, telles que la position du barycentre de cet ensemble de feuilles sur l'image acquise et la surface foliaire totale (figure 13). A partir de ces données d'images, un travail d'asservissement du bras manipulateur UR5 a été effectué. L'objectif était d'utiliser les données images pour positionner son extrémité au-dessus d'une plante.



Figure 13 - Détection des feuilles de betteraves par traitement d'image

La pose désirée du capteur est estimée en fonction des données capteurs. Tout d'abord, un algorithme de traitement d'image extrait les zones vertes de l'image observée (par seuillage et morphologie) puis récupère les différentes informations que sont la position du barycentre de cette zone dans l'image et sa taille en pixel, comme montré sur la figure précédente. Dans un premier temps, le but à atteindre est de venir superposer le barycentre de cette zone avec le centre de l'image. Pour cela, on calcule le déplacement à effectuer dans le repère caméra, pour l'instant simplement en déplaçant le capteur dans un plan parallèle au sol, puis on exprime ce déplacement dans le repère global à l'aide de changements de repère successifs. On obtient alors la pose de l'effecteur désirée.

5-4 Commande/déplacement du système

Une fois la pose de l'effecteur désirée estimée, le système est mis en mouvement selon une loi de commande qui a été développée afin de gérer la redondance du système. Pour contrôler le robot, on se base alors sur l'optimisation de l'espace de travail du bras manipulateur. Le but final étant de venir observer les feuilles selon différents points de vue, il faut donc que l'orientation de la caméra puisse être modifiée. Par conséquent, l'espace de travail du bras manipulateur doit être le plus grand possible, lorsque la caméra est centrée au-dessus d'une plante, pour permettre ce changement d'orientation.

Pour ce faire, on se base alors sur la distance entre la position désirée de la caméra et les limites de l'espace de travail du bras manipulateur (figure 14). Si cette position est à l'intérieur de l'espace de travail du bras manipulateur, seul ce dernier est mis en mouvement. En revanche, si la position à atteindre est trop éloignée, le support translate afin de centrer l'espace de travail du bras manipulateur au-dessus de la plante à observer, i.e. afin de centrer la base du bras manipulateur au maximum au-dessus de la plante.

En pratique, un coefficient λ est défini en fonction de la distance entre la position désirée du capteur et des limites de l'espace de travail du bras manipulateur, selon un axe parallèle à celui de l'axe linéaire. Ses valeurs sont comprises dans l'intervalle $[-1 ; 1]$ de manière à ce que, lorsque la pose désirée du capteur est proche du centre de l'espace de travail, λ est nul et, dans ce cas, seul le bras manipulateur est mis en mouvement. En revanche, si la pose désirée est à l'extérieur de l'espace de travail, ou bien proche de la limite, on a alors $\lambda = \pm 1$ (le signe diffère en fonction du sens du déplacement à effectuer), et l'axe linéaire uniquement se déplace dans le but de centrer la base du bras manipulateur au-dessus de la plante. Si la plante à observer se situe entre les deux cas précédents, alors le bras manipulateur et l'axe linéaire se déplacent de manière coordonnée. Une fois ce coefficient λ déterminée, on envoie alors deux commandes : une pour l'axe linéaire qui est proportionnelle à λ , et une seconde pour les articulations du bras manipulateur, qui est cette fois inversement proportionnelle à λ .



a) Plante située dans l'espace de travail du bras



b) Plante à l'extérieur de l'espace de travail du bras

Figure 14 - Influence de l'espacement entre la position désirée pour la caméra et l'espace de travail du bras manipulateur

Sur la figure (a), on peut remarquer que la plante se situe quasiment sous la base du bras manipulateur, fixée sur le support en translation. Dans ce cas, le bras seul peut venir se positionner au-dessus de la plante, tout en gardant une liberté de mouvement suffisante pour permettre le changement d'orientation de la caméra. Au contraire, sur la figure (b), la plante étant trop éloignée de la base du bras manipulateur, la translation du support est alors nécessaire pour pouvoir permettre un changement d'orientation une fois la caméra centrée au-dessus de la plante.

5-5 Résultats

L'approche de la commande exposée précédemment a été testée sur le système réel. Les courbes suivantes sur la figure 15 représentent l'évolution du coefficient lambda, de la vitesse de l'axe linéaire et des vitesses respectives de chacune des articulations du bras manipulateur en fonction du temps. La colonne de gauche montre le comportement du système dans le cas où la plante à observer se trouve dans l'espace de travail du bras manipulateur (figure 14, cas a), tandis que celle de droite représente le cas où la plante est située à l'extérieur de l'espace de travail (figure 14, cas b).

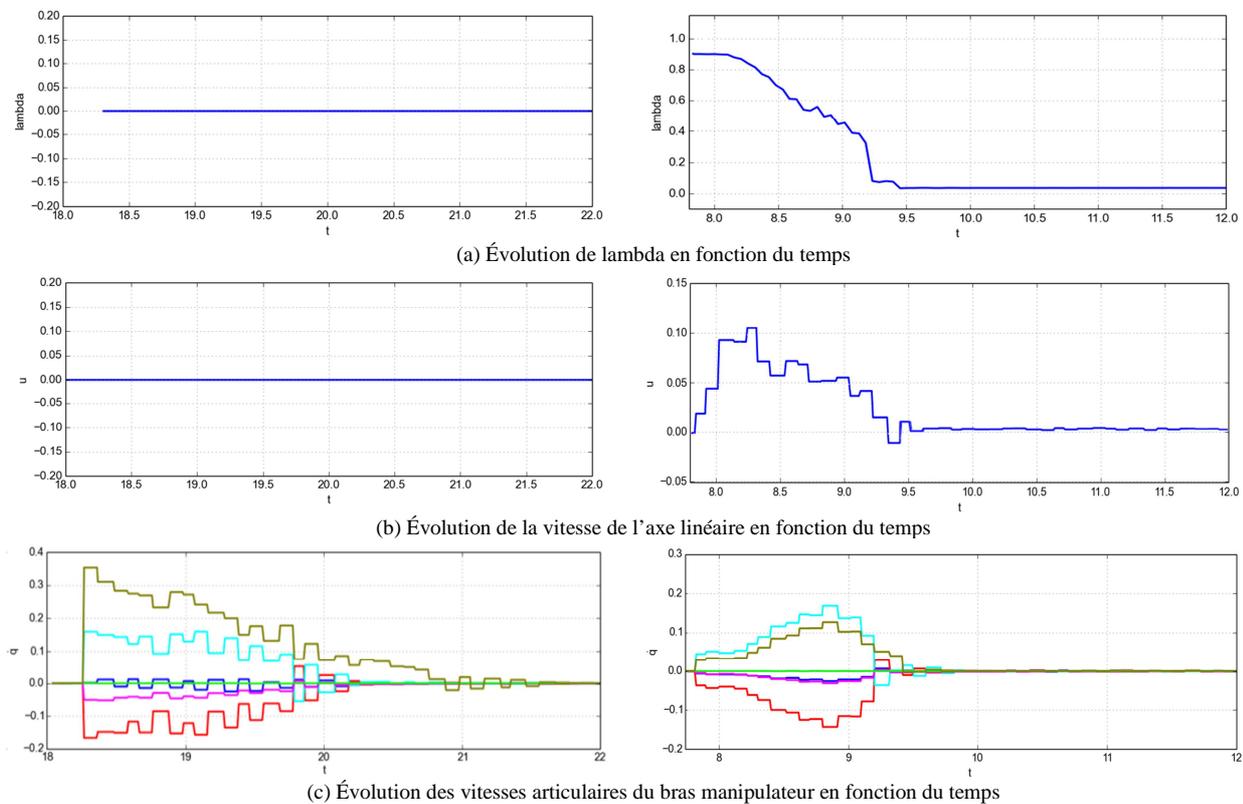


Figure 15 – Résultats expérimentaux

Dans le premier cas, comme la pose désirée du capteur est située dans l'espace de travail, le coefficient λ est nul et seul le bras manipulateur est en mouvement. En effet, la vitesse de l'axe linéaire est nulle dans ce cas, alors que les vitesses articulaires du bras manipulateur évoluent en fonction du temps, jusqu'à devenir nulles lorsque le capteur est centrée au-dessus de la plante.

Dans le second cas, la pose désirée du capteur est située à la limite de l'espace de travail. La valeur de λ alors quasiment égale à 1 et la vitesse sur l'axe linéaire est donc non nulle. On observe aussi que l'évolution de la vitesse de l'axe suit l'évolution de λ , elle augmente au départ jusqu'à atteindre la vitesse maximum, puis diminue en même temps que λ , ce qui correspond bien à la relation de proportionnalité entre les deux grandeurs. Pendant ce temps, les vitesses articulaires sont assez faibles au départ, comme λ est grand, puis augmentent au fur et à mesure que λ diminue, et deviennent nulles lorsque le capteur se trouve au-dessus de la plante.

5-6 Conclusions et perspectives

Pour conclure, le fonctionnement de l'algorithme explicité précédemment est satisfaisant. Il permet de pondérer le déplacement de l'axe linéaire et du bras manipulateur en fonction de l'espace de travail du bras manipulateur. Cela permet d'optimiser cet espace afin d'exécuter des trajectoires d'observations autour des feuilles. De plus, le calcul du coefficient entre les deux commandes peut être paramétré en fonction du comportement recherché : il est possible de donner plus de poids au déplacement du bras manipulateur, ou, au contraire, de favoriser le déplacement de l'axe linéaire. Les différentes perspectives concernant cette partie vont être de développer la détection afin de ne plus détecter simplement une plante, mais chaque feuille indépendamment, ainsi que certaines caractéristiques si possible, telle que la nervure centrale. Par conséquent, cela permettra de venir observer les feuilles une par une, et de tester différentes trajectoires d'observation. Il sera aussi possible de venir intégrer le calcul d'une caractéristique de qualité d'image importante, comme la luminosité par exemple, afin de déterminer le meilleur point de vue concernant ce paramètre. Cette approche pourra être étendue à d'autres paramètres, en fonction des caractéristiques de l'image nécessaires à une bonne détection.

Conclusions

En 2017, la plateforme robotisée Bettybot a été prise en main, en s'intéressant à différents aspects dans le domaine de la robotique, pour répondre aux besoins du projet Phénaufol : mobilité de l'axe linéaire et du bras UR5, perception avec l'utilisation d'une caméra couleur, fixée à l'extrémité du bras manipulateur, opérations de contrôle/commande, en travaillant d'une part en boucle ouverte, c'est-à-dire en envoyant des commandes sur les 7 degrés de liberté de Bettybot, pour positionner la caméra couleur aux endroits désirés pour faire des acquisitions et du traitement d'image, et d'autre part en boucle fermée, pour commander automatiquement les 7 degrés de liberté, à partir des données obtenues, en temps réel, par traitement d'image.

Des travaux d'acquisition et de traitement d'image ont aussi été réalisés pour des stades de croissance peu avancés, avec le robot mobile Jaguar, dans le but d'obtenir des images cartographiques des raies de betteraves et de réaliser des mesures géométriques et colorimétriques.

Perspectives

En 2018, les travaux dans le hall technologique d'Irstea à Clermont-Fd, seront poursuivis jusqu'au mois de Mai/Juin. Les travaux portant sur la perception active (asservissement du robot BettyBot à partir des données images) seront réalisés en travaillant sur plusieurs plantes alignées, en optimisant les algorithmes de contrôle/commande du bras UR5 et de l'axe linéaire, en prenant en compte les redondances.

En matière de traitement d'image, le travail portera sur différents points :

- Détecter individuellement chaque feuille de betterave (en s'intéressant à des éléments tels que la forme 'ovale' des feuilles, la recherche des nervures et des tiges des plantes,...)

- Obtenir le profil 3D des feuilles, en n'utilisant qu'une caméra (les déplacements de la caméra par rapport aux feuilles permettront à l'aide d'algorithmes existants d'avoir le profil 3D des feuilles, en prenant en compte l'appariement de points sur des images successives).
- A partir de ces profils 3D des feuilles, l'objectif sera de positionner, avec des algorithmes de commande, intelligemment, la caméra (orientation et hauteur) par rapport à chaque feuille, pour pouvoir ainsi faire des acquisitions d'image (plusieurs acquisitions par feuille), avec la précision désirée (1 pixel = 3mm). Les algorithmes de traitement d'images développés à Dijon pourront alors être appliqués pour la détection des maladies foliaires.
- Des tests d'acquisition d'images dans des conditions de luminosité très variables (temps ensoleillé, temps couvert, problèmes d'ombres, ...) seront réalisés, en utilisant des systèmes de flash synchronisés avec la caméra utilisé, dans le but d'obtenir des images d'intensité lumineuse stable, quel que soit la luminosité de l'environnement. Ce travail sera mené en collaboration avec la société Phoxène de Lyon, qui développe des systèmes d'éclairage adaptés pour des acquisitions d'image dans des situations complexes.

Un stagiaire niveau Master 2 (IMERIR, Perpignan) travaillera sur ces opérations de traitement d'image, pour détecter individuellement les différentes feuilles de betteraves, et obtenir pour chacune d'elles des informations géométriques, telles que la position du centre de gravité, la surface, les axes d'inertie,...dans l'environnement 3D. Ces informations obtenues par vision artificielle seront utilisées en temps réel dans les algorithmes de contrôle/commande pour positionner le capteur aux endroits désirés, pour chaque feuille. Ce travail expérimental dans le hall technologique (Mars - Mai 2018) sera réalisé avec des plantes en pot (betteraves ou autres cultures). Des betteraves seront semées sur le site de Montoldre, en Mars 2018. Dans un premier temps, pour les premiers stades de croissance (de 2 à 6 feuilles), des expérimentations de suivi de lignes autonomes et d'enregistrement de cartographie des raies de betteraves seront réalisées avec le robot mobile Jaguar. Des mesures géométriques et colorimétriques seront réalisées sur ces plants de betterave. Certains plants seront récupérés et mis en pot, pour réaliser des expérimentations avec BettyBot, dans le hall technologique d'Irstea. Le travail d'acquisition et de traitement d'image et d'asservissement des 7 degrés de libertés de BettyBot portera alors sur un ensemble de plantes alignées sur une longueur de 2-3 mètres. Des algorithmes de traitement d'image développés à AgroSup Dijon, pour la détection des maladies, avec caméra hyperspectrale et caméra couleur pourront être testés sur ces plantes.

A partir de fin Mai – Juin 2018, le robot BettyBot sera monté sur le tracteur Lamborghini de l'ITB. Les travaux d'acquisition et de traitement d'image et d'asservissement du robot seront alors effectués sur des ensembles de plants (2–3 mètres de longueur de raie) pour des stades de croissance élevés (de Juin à Septembre 2018) sur des parcelles de l'ITB. Le positionnement automatique du tracteur sur une raie de betteraves, pourrait être réalisé par commande référencée vision en utilisant une caméra type webcam pour détecter une raie et guider le tracteur (Bus CAN) pour que l'axe linéaire de BettyBot soit parfaitement aligné avec la raie désirée. Mais, dans un premier temps, en 2018, le pilote du tracteur pourra disposer d'un écran, pour visualiser les raies de betteraves (image de la caméra webcam) et ainsi guider et arrêter le véhicule manuellement quand l'axe linéaire est aligné avec la raie de betterave sur laquelle on veut travailler.