

TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	6
Chapitre 1 Revue de la littérature	10
1.1 Introduction	10
1.2 Stratégie de maintien de la solution nutritive.....	11
1.3 Technique de surveillance.....	21
1.4 Conclusion	40
Chapitre 2 Conception et réalisation du montage expérimental	41
2.1 Introduction.....	41
2.2 Modélisation d'un système hydroponique à circuit fluide fermé	43
2.2.1 Modélisation du comportement d'absorption	43
2.2.2 Modélisation du système asservi du système fluide fermé.....	45
2.2.3 Simulation du système asservi	50
2.3 Description du montage expérimental	55
2.3.1 Montage pour les essais de la technique de la spectrométrie par impédance ..	56
2.3.2 Montage pour les essais de la technique de la fluorescence	58
2.3.3 Calibration des caméras	61
2.4 Conclusion	63
Chapitre 3 Évaluation du système de surveillance proposé.....	65
3.1 Introduction.....	65
3.2 Protocole expérimental	66
3.3 Traitement des données brutes des caméras	67
3.4 Résultats.....	72
3.5 Analyse des résultats.....	75
3.5.1 Analyse de la fluorescence.....	75
3.5.2 Classification.....	87
3.6 Discussions	91
3.7 Conclusion	94
Chapitre 4 Conclusion et travaux futurs	96
Travaux futurs.....	98
Référence	101

TABLE DES FIGURES

Figure 1 Exemple de culture hydroponique.....	8
Figure 2 Production totale (A) et commercialisable (B) en fonction de la conductivité électrique de la solution [6].....	12
Figure 3 Stratégie de fertilisation proposée par Neto, et al. [7].....	13
Figure 4 Stratégie d'irrigation proposé par Neto, et al. [7].....	13
Figure 5 Système fermé de Santamaria, et al [8].	14
Figure 6 Récapitulatif des stratégies utilisé par Massa, et al. [11]	19
Figure 7 Résultats obtenu par Massa pour la production de fruit, l'absorption d'eau et de nutriments [7].....	20
Figure 8 Schéma bloc du système de commande et de contrôle intelligent de Morimoto[17].....	23
Figure 9 Schéma bloc du système de contrôle de modifier afin d'inclure l'optimisation environnementale[18]	23
Figure 10 : Distribution de l'énergie [19]	25
Figure 11 : Courbe de fluorescence typique de la chlorophylle (Nishina [20]).....	26
Figure 12 Structure moléculaire de la Chlorophylle A.....	27
Figure 13: Relation entre la réflectance foliaire mesurée et la concentration en azote foliaire pour la pomme de terre [24].	28
Figure 14 : Relation entre la mesure de la réflectance foliaire et le moment de la journée pour des plants de pommes de terre âgées de 64 DAP et 96 DAP [24].....	28
Figure 15 Point de mesure (gauche) et distribution du rapport P/S (Nishina [20]).	29
Figure 16 Montage LIF utilisée par Lavrov, et al. [28]	30
Figure 17 Résultats des spectrographies de Lavrov, et al. [28]	31
Figure 18 Mesure du flétrissement de l'essai de Ahmad, et al. [29].	32
Figure 19 Mesure du développement des plants de l'essai de Ahmad, et al. [29]	33
Figure 20 Chaîne de traitement de Tomkiewicz and Piskier [30]	34
Figure 21 Changement de l'index P(K) durant les essais de Tomkiewicz and Piskier [30]	35
Figure 22 Exemple de mesure prise par Munoz-Huerta [31]	36
Figure 23 Relation entre la fréquence du minimum de phase et.....	37
Figure 24 Design du dispositif de Lee, et al. [35] (a) positionnement des électrodes d'excitation (b) position des capteurs de tension électrique.....	38
Figure 25 Reconstitution 3D à partir des mesures de champs électriques en 2D [35]	39
Figure 26 Schématique du système fluide fermé étudié	46
Figure 27 Schémas d'asservissement de la masse d'eau	47
Figure 28 Schémas d'asservissement de la concentration en nutriments	47
Figure 29 Graphique des perturbations dans le système simulé	53
Figure 30 Comparaison entre les sorties du système avec et sans compensateur pour la concentration en nutriments du système simulé	54
Figure 31 Comparaison entre les sorties du système avec et sans compensateur pour la masse d'eau du système simulé	54
Figure 32 Schémas de mesure de l'impédance électrique.....	57
Figure 33 Résultats des mesures d'impédance électrique	58

Figure 34 Montage expérimental	59
Figure 35 Installation du montage expérimental dans la chambre de croissance	60
Figure 36 : Dispositif d'acquisition (première version)	60
Figure 37 : Dispositif d'acquisition (seconde version).....	61
Figure 38 Comparatif des valeurs retournées par les capteurs des caméras avant calibration	62
Figure 39 Comparatif des valeurs retournées par les capteurs des caméras après calibration	63
Figure 40 Chaîne de traitement des données de fluorescence	68
Figure 41 Effet du champ de vision.....	69
Figure 42 Exemple d'images ayant la même valeur moyenne des pixels rouges différents zéro.....	69
Figure 43 Exemple d'images ayant la même valeur moyenne filtrée normalisée.....	71
Figure 44 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 0 ppm de nutriments (premier groupe d'essai)	73
Figure 45 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 400 ppm de nutriments (second groupe d'essai)	73
Figure 46 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 800 ppm de nutriments (second groupe d'essai)	74
Figure 47 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 1200 ppm de nutriments (premier groupe d'essai)	74
Figure 48 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 1600 ppm de nutriments (second groupe d'essai)	75
Figure 49 Comparatif des courbes moyennes pour l'été 2015	76
Figure 50 Comparatif des courbes moyennes pour l'automne 2015	77
Figure 51 Valeurs du point P pour l'essai E2015	78
Figure 52 Valeurs du point P pour l'essai A2015.....	79
Figure 53 Valeurs du point S pour l'essai E2015	79
Figure 54 Valeurs du point S pour l'essai A2015.....	80
Figure 55 Valeurs du point M pour l'essai E2015.....	80
Figure 56 Valeurs du point M pour l'essai A2015	81
Figure 57 Valeurs des ratios P/S pour E2015	81
Figure 58 Valeurs des ratios P/S pour A2015.....	82
Figure 59 Valeurs des ratios M/S pour E2015.....	82
Figure 60 Valeurs des ratios M/S pour A2015	83
Figure 61 Valeurs des ratios P/M pour E2015.....	83
Figure 62 Valeurs des ratios P/M pour A2015	84
Figure 63 Schéma du système d'évaluation nutritionnel	87
Figure 64 Fonctions d'appartenance de M/S.....	88
Figure 65 Fonctions d'appartenance de P/M.....	88
Figure 66 Fonctions d'appartenance de P/S	89
Figure 67 Fonctions d'appartenance de l'indice nutritionnel.....	89

Introduction

Considérant le climat du Québec, il est impossible de récolter des fruits et légumes des champs à longueur d'année. La période de production débute généralement au mois d'avril et se termine au mois d'octobre. Par conséquent, le recours à des serres permet d'allonger la période de récolte. Puisque ces dernières sont en milieu fermé, elles sont moins influencées par variations des conditions environnementales. Cependant, l'optimisation des récoltes demeure une problématique importante.

Selon une étude menée par le Groupe AGÉCO, 55 % des producteurs en serre québécoise interrogés considèrent que leur entreprise est insuffisamment modernisée [1]. Parmi les répondants, 10 % souhaiteraient augmenter leur rendement, 6 % désireraient augmenter leur taux de mécanisation et d'automatisation et 5 % aimeraient avoir une meilleure gestion de l'eau et de l'irrigation de leur serre. Cela touche principalement les serres ayant une superficie inférieure à 2000 m².

La culture hydroponique est souvent utilisée en serriculture et consiste à cultiver des plantes dans un substrat inerte. La figure 1 présente un exemple de culture hydroponique en serre. L'apport en éléments nutritifs provient d'une solution nutritive irriguant le substrat dans le cas des techniques de culture en eau profonde et sur film nutritif. Elle est composée des éléments nécessaires à la croissance de l'espèce cultivée. Cette dernière est composée spécifiquement pour apporter les éléments nécessaires à la croissance de la plante cultivée. Les plantes vont absorber ces éléments via leurs racines qui sont immergées dans la solution. Dans un système hydroponique ouvert, c'est-à-dire un système où la solution est utilisée qu'une seule fois et est mise au rebut par la suite,

l'impact de l'absorption des nutriments de la solution est négligeable. Cependant, dans un système où la solution est recirculée, cela peut entraîner une diminution de la concentration en élément nutritif et éventuellement des carences en éléments nutritifs. La majorité des stratégies de contrôle utilise la concentration en sel dissous afin de compenser cette perte. Cette mesure se fait généralement de manière indirecte en utilisant la conductivité électrique de la solution nutritive. Lorsque la concentration passe en dessous d'un certain seuil, la solution nutritive est changée, partiellement renouvelée ou rechargée en élément nutritif. Ces sondes sont influencées par les solides en suspensions et les bulles d'air dans la solution. Ces systèmes de compensation ne sont pas à l'abri de complications, par exemple une accumulation de biofilm ou de sédiment à l'intérieur du système de distribution de la solution nutritive modifiant ainsi la dynamique du système. Ainsi, un second système de surveillance est nécessaire afin d'éviter des pertes de production. Ce dernier permettrait de surveiller le statut nutritionnel des plants cultivés. Ce système complémentaire ne devait pas être soumis aux mêmes problèmes que les sondes de conductivité électrique. Parmi les techniques étudiées, l'utilisation de la fluorescence de la chlorophylle semble prometteuse. Cependant, la majorité des instruments permettant d'effectuer cette mesure ne permet pas d'automatiser la procédure et utilise un faible échantillonnage. Certaines technologies basées sur des techniques d'imagerie sont disponibles pour évaluer la fluorescence de la chlorophylle sur une plus grande surface.



Figure 1 Exemple de culture hydroponique

Cependant, leurs coûts d'acquisition sont élevés. Ces coûts couvrent le développement logiciel et l'achat du matériel de haute technologie utilisée. Or, 72% des entreprises interrogées par le Groupe AGÉCO ont un chiffre d'affaire annuelle inférieur à 175 000\$ [1], ce qui ne favorise pas l'acquisition et l'exploitation de cette technologie.

Les travaux de recherche devront évaluer les avenues liées à la conception d'un système de diagnostic de faible coût et accessible aux producteurs de petite taille. Les systèmes à faible coût sont généralement retrouvés dans la communauté du libre accès. De plus, le développement de matériel libre de droits gagne en popularité et en performance. Rapidement, plusieurs fabricants ont développé des plateformes qui sont rapidement devenus des incontournables dans la communauté du libre accès. L'utilisation de ce matériel permettrait de diminuer les coûts d'acquisition du dispositif de surveillance.

Cependant, peu de travaux ont été effectués sur cette technologie afin d'évaluer leur potentiel afin de mesurer des paramètres liés à la santé de la plante dont la fluorescence de la chlorophylle. Un objectif secondaire de ce projet de recherche est de réaliser un système complet de commande et de surveillance de la santé de la plante (statut nutritionnel par le biais de la fluorescence de la chlorophylle) basés sur des technologies de libre accès.

La conception de ce type de système de surveillance nécessite, dans un premier temps, une revue de la littérature approfondie afin d'évaluer les techniques les plus récemment exploitées. Cette revue comporte les éléments nécessaires à la compréhension des enjeux des systèmes hydroponiques en circuit fluidique fermé et des techniques d'évaluation du statut nutritionnel. En utilisant la technique de la revue littéraire la plus appropriée au projet, une modélisation d'un système hydroponique en circuit fluidique est proposée afin de bien comprendre la dynamique d'un tel système. Ce dernier prend en considération plusieurs facteurs influençant la croissance des plants de tomates. Des compensateurs de niveau d'eau et de nutriments ont été élaborés afin de maintenir la solution nutritive à un niveau optimal. La conception du capteur est par la suite proposée de même que les essais effectués ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre 1

Revue de la littérature

1.1 Introduction

Plusieurs initiatives dans la communauté libre de droit porte sur l'automatisation des jardins hydroponiques ont apparus au courant des dernières années. Le but de ces initiatives est de développer des systèmes automatisés pouvant être utilisés par des utilisateurs n'ayant peu ou pas d'expérience dans ce type de culture. Cependant, les systèmes hydroponiques actuellement développés sont majoritairement à circuit fluidique fermé sans système de maintien de la solution nutritive et de système de surveillance.

L'objectif de la présente revue littéraire est de dégager certaines tendances actuelles sur les méthodes de maintien de la solution nutritive et de l'évaluation du statut nutritionnel. Cette revue permettra de dégager les éléments clés des travaux de recherche et nous amènera à identifier des contributions aux développements d'un système de commande en boucle fermée de la solution nutritive en incluant la condition de la santé des plants de tomates en temps réel.

Dans un premier temps, les diverses stratégies de maintien de la solution nutritive en système fluidique ouvert et fermé seront étudiées. Ces stratégies reposent sur la mesure et le maintien de la valeur de l'électroconductivité (EC) de la solution nutritive. Par la suite, diverses techniques de surveillance seront étudiées afin de mesurer le statut nutritionnel des plants cultivés. Cette dernière technique repose sur des phénomènes électriques et des algorithmes de vision numérique.

1.2 Stratégie de maintien de la solution nutritive

Plusieurs auteurs ont étudié les impacts de la solution nutritive sur les cultures et ces derniers ont proposé des méthodes de maintien en fonction de leur objectif. Cette section abordera l'influence de la conductivité électrique de la solution nutritive sur la production de tomates de serre et l'ajustement de la solution nutritive en fonction du lixiviat¹ sortant d'un système ouvert. Par la suite, ce chapitre étudiera l'impact de l'irrigation souterraine sur les systèmes hydroponique, la prédiction l'accumulation des sels minéraux et l'influence de quatre stratégies de fertigation² sur le taux de recouvrement de l'eau et des nitrates.

Premièrement, les ions dissous dans la solution nutritive exercent une pression osmotique sur la membrane des racines. Cette pression favorise l'absorption des nutriments. Ainsi, la conductivité électrique (EC) de la solution, provenant de la mobilité des ions et de leurs concentrations, devient un facteur prédominant à étudier. La mesure de la conductivité électrique (EC) est souvent utilisée afin d'évaluer la quantité d'ions dans la solution indépendamment de leur nature. En fonction de l'espèce cultivée et de l'environnement, l'EC peut varier entre 1.4 et 10 dS m⁻¹ [5]. L'efficacité de la production totale et commercialisable des tomates est influencée par ce paramètre. Li, et al. [6] ont déterminé que l'efficacité de la production diminue de 5.1 % pour chaque dS m⁻¹ lorsque la conductivité électrique était au-dessus du seuil de 2 dS m⁻¹ pour la tomate. La figure 2

¹ Lixiviat : liquide résiduel provenant de la percolation de l'eau à travers un matériel

² Fertigation : technique agricole consistant à appliquer des éléments fertilisant solubles dans l'eau par l'intermédiaire du système d'irrigation

présente cette relation. Par conséquent, le suivi de ce paramètre s'avère nécessaire dans un processus d'optimisation de la production.

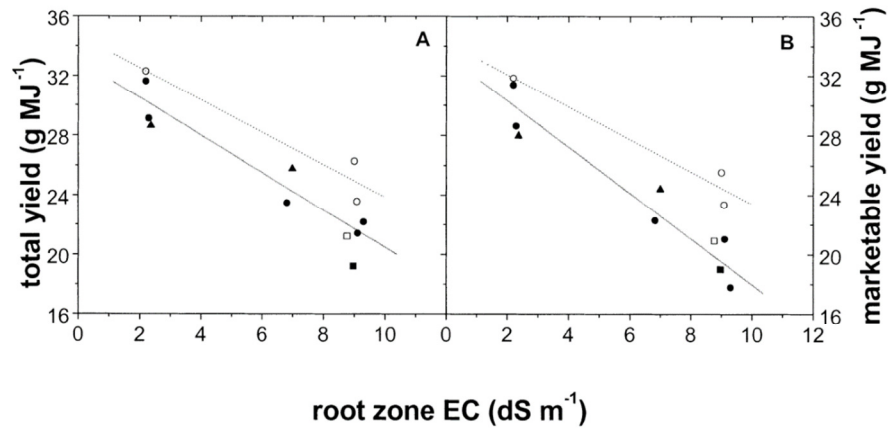


Figure 2 Production totale (A) et commercialisable (B) en fonction de la conductivité électrique de la solution [6].

Neto, et al. [7] ont conçu un système permettant d'ajuster la composition de la solution nutritive en fonction du lixiviat produit à la sortie de leur système d'irrigation. Ils utilisaient les variables environnementales, telles que la température, l'humidité et la radiation solaire totale reçue, afin de déterminer les besoins de la culture et ainsi les caractéristiques de la solution nutritive. Leur système permettait d'ajuster le volume et la concentration de la solution nutritive distribuée ainsi que le temps entre chaque cycle de fertigation. Pour ce faire, ils utilisaient un modèle de prédiction de l'évapotranspiration et la conductivité du lixiviat en temps réel. La fraction de drainage (ratio entre la quantité de lixiviat et de solution d'irrigation) visée était de 20%. La consommation d'eau fut de 44.42 l m⁻² pour cette technique comparativement à 59 l m⁻² en irrigation goutte à goutte [8] sans réutilisation du lixiviat. Les figures 3 et 4 présentent les systèmes élaborés par Neto.

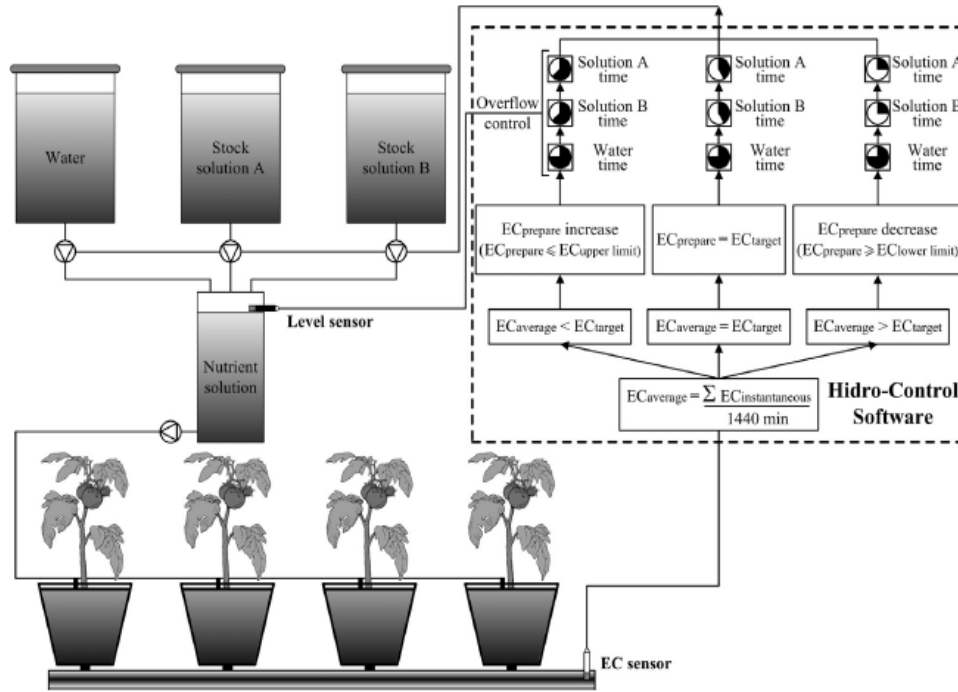


Figure 3 Stratégie de fertigation proposée par Neto, et al. [7]

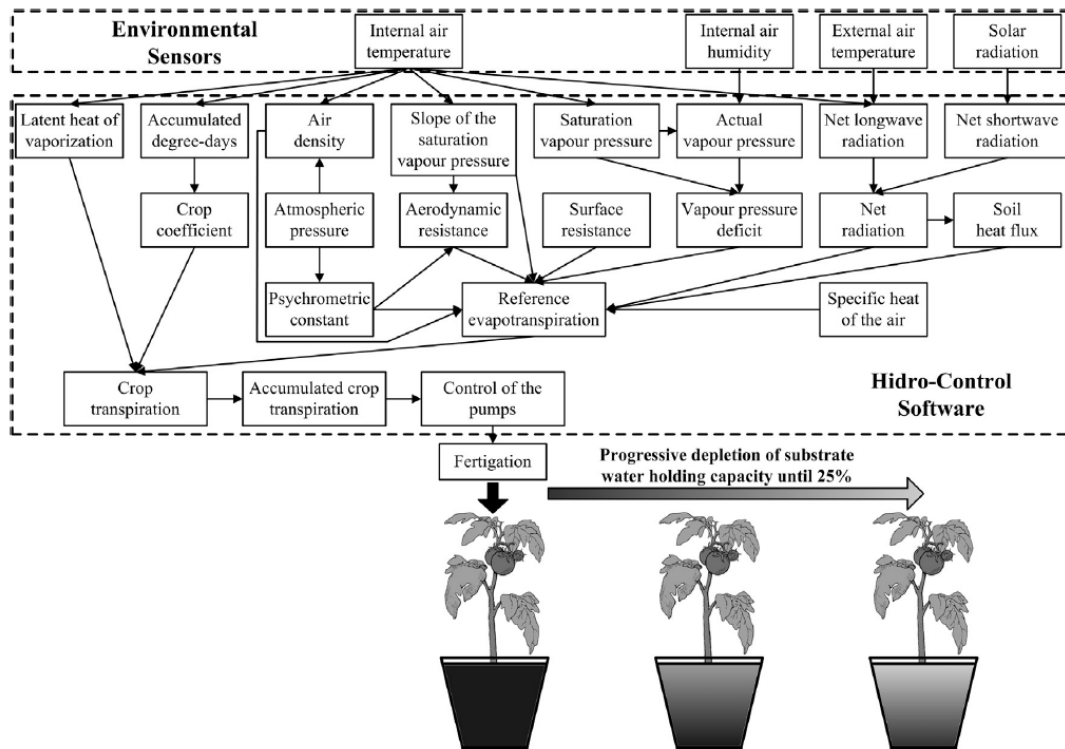


Figure 4 Stratégie d'irrigation proposé par Neto, et al. [7]

Santamaria, et al. [8] ont comparé un système d'irrigation souterraine à circuit fermé et un système goutte à goutte à circuit ouvert pour la tomate cerise (figure 5). Pour le système goutte à goutte, la fraction de drainage était fixée à 30%. Le cycle d'irrigation de ces derniers était de 5 à 12 fois par jours pour une durée de 1 à 3 minutes. La composition de la solution nutritive était fixe. Le lixiviat était récupéré aux fins d'analyse de pH et d'électroconductivité (EC) seulement. Le débit des émetteurs était de 2 l h^{-1} . Pour le système d'irrigation souterraine, les cycles étaient de 3 à 7 fois par jours pour une durée de 20 à 30 minutes.

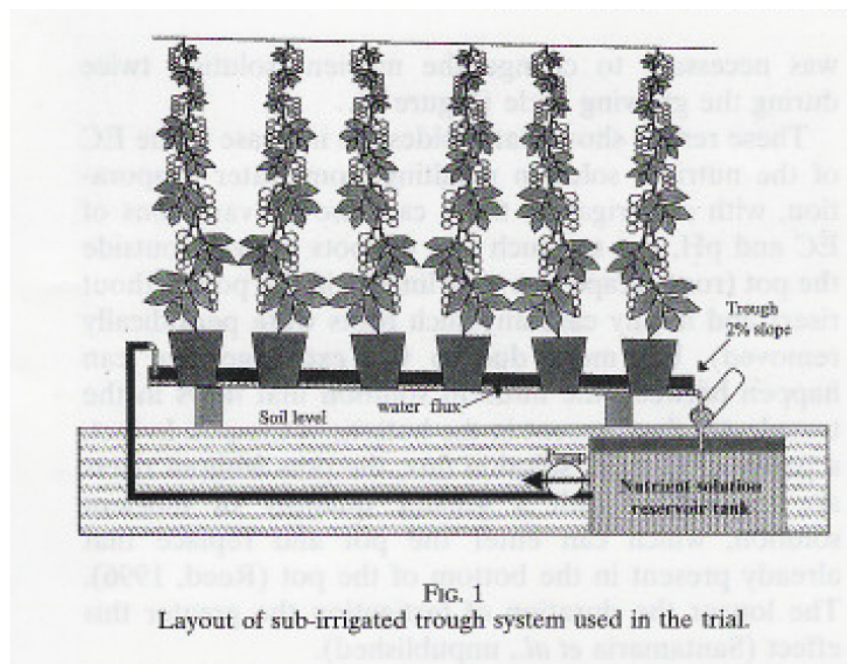


Figure 5 Système fermé de Santamaria, et al [8].

Dans le système à irrigation souterraine, le lixiviat était récupéré et retourné à un réservoir de stockage de la solution. L'irrigation s'effectuait à l'aide d'une pompe de

recirculation ayant un débit de 4 l min^{-1} . Lorsque le niveau du réservoir atteignait 50% de sa capacité, ce dernier était rempli à l'aide de solution nutritive concentrée et d'eau à son niveau initial avec un EC entre 3.5 et 4.5 dS m^{-1} . Ce système a consommé 5 l d'eau de moins que le système goutte à goutte. Cependant, ce système a produit 13 % moins de fruits que le système goutte à goutte. Les résultats obtenus pour ses essais sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 Résultats pour les essais de Santamaria et al.[8]

Type d'irrigation	Design du panier	Production			Consommation d'eau (g plant^{-1})	Efficacité d'absorption d'eau (g L^{-1})
		Masse (g)	Nombre	Masse moyenne par fruit (g)		
souterraine	6 trous	2111	104	20	89	27,7
souterraine	4 trous + marche	1961	103	19		
souterraine	8 trous + marche	2036	104	19,5		
Goutte à goutte	8 trous + marche	2442	108	21	84	24,7
Seuil de signification		$p < 0,01$	n.s.	$p < 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,01$

Carmassi, et al. [9] ont modélisé l'accumulation des sels minéraux afin de prédire l'évolution de la solution nutritive dans un système fluide semi-fermé puisque l'absorption de nutriments ne s'effectue pas au même taux que l'absorption d'eau. La modélisation de la variation des niveaux de nutriments et de la masse d'eau contenue dans le réservoir a été réalisée. Ils ont calibré leur modélisation à l'aide de dix essais se déroulant sur une période de deux ans. À la fin de chaque essai, les modèles utilisés

étaient ajustés afin d'augmenter la précision des prédictions. La solution nutritive était renouvelée à chaque fois que cette dernière atteignait la valeur maximale de conductivité établie. À la fin de cette étude, la précision des prédictions de l'absorption d'eau et de nutriments était suffisamment élevée pour être utilisée dans la gestion de la fertigation de serre de production.

Par la suite, le modèle d'absorption d'eau a été amélioré afin d'ajouter le développement foliaire et le rayonnement solaire reçu par les plants [10]. De plus, ils ont évalué l'influence de la teneur en sodium, contenu dans l'eau utilisée dans certaines régions sous forme de chlorure de sodium, pour le renouvellement de la solution dans leur modélisation. Ces ajouts dans le modèle favorisent une meilleure prédiction du comportement réel du système.

En particulier, le cation de sodium s'accumule plus ou moins rapidement en fonction de sa teneur dans l'eau utilisée [11]. Lorsque la concentration de ce dernier dépassait la limite établie, la solution nutritive était partiellement changée afin de ramener ce dernier à l'intérieur des limites. Pour ce faire, les essais ont été divisés en 2 groupes. Le premier utilisait de l'eau avec une teneur de 10 mol m^{-3} de chlorure de sodium (NaCl) et le second, 20 mol m^{-3} . Aucun écart significatif sur la production totale de tomates n'a été observé entre ces 2 groupes. Le tableau 2 présente les résultats obtenus.

Tableau 2 Résultats obtenu lors de l'essai de Carmassi, et al. [9] pour 2 groupes ayant un taux de sodium différent en circuit fluide semi-fermé

	T10 (10 mol m-3NaCl)	T20 (20 mol m-3NaCl)	Seuil de signification
Biomasse sèche (g plant-1)	366.0 ±3.5	356.7±5.0	NS
Production de fruit (kg m-2)	10.1± 0.5	9.6±0.3	NS
Nombre de fruits par mètre carré (fruit m-2)	61.3± 2.4	65.2±1.6	NS
Masse moyenne des fruits (g)	164.7±2.1	147.2±2.8	P≤0.05

Durant le printemps et l'été 2005 et 2006, Massa, et al. [11] ont exploré l'influence de diverses stratégies (voir les stratégies A, B et C dans les paragraphes suivants) sur l'efficacité de l'absorption d'eau et de nutriments de la tomate de serre en circuit semi-fermé. Le substrat utilisé était la laine de roche. Zekki, et al. [12] ont démontré que ce type de substrat peut être utilisé dans les systèmes à recirculation sans qu'il ait de perte de rendement. L'eau utilisée provenait des aquifères souterrains et contenait du chlorure de sodium. Par conséquent, ce sel s'accumulait dans le système en circuit semi-fermé.

Pour la stratégie A, la concentration en nutriments de la solution nutritive a été maintenue à un niveau proche à celle de référence. L'absorption d'eau et de nutriments a été comblée à l'aide de la solution de référence. Puisque le système était semi-fermé, il a eu une accumulation de NaCl dans le réservoir de recirculation. Par conséquent, il était impossible de mesurer la concentration en élément nutritif à l'aide de l'EC. Afin de maintenir la solution à un niveau stable, ces derniers ont utilisé des modèles élaborés lors de précédente recherche à l'aide du même cultivar. La solution nutritive du réservoir était changée lorsque l'EC atteignait une valeur critique, soit 4.5 dS m⁻¹.

La stratégie B consistait à maintenir à un niveau constant l'EC. La solution de compensation a été adaptée afin de maintenir cette valeur. Puisque l'eau utilisée pour l'élaboration de cette solution contient du NaCl, ce dernier s'accumulait progressivement

dans le système et faussait la mesure de l'EC. Lorsque la teneur en nitrate chutait en dessous de la valeur minimale, soit 1.0 mol m^{-3} , la solution du réservoir de recirculation était changée.

La stratégie C était une combinaison des deux premières. Dans un premier temps, l'absorption d'eau et de nutriments était compensée avec la solution de référence. Lorsque l'EC atteignait le seuil de 4.5 dS m^{-1} , la solution de remplissage ne contenait que de l'eau avec du NaCl. La solution était changée lorsque la teneur en nitrate chutait en dessous de 1.0 mol m^{-3} .

La dernière stratégie était leur référence. Ce dernier était en circuit ouvert et utilisait seulement la solution de référence. La fraction de drainage³ était élevée, soit 0,5. L'EC du lixiviat devait être maintenu en dessous de 3.5 dS m^{-1} afin d'éviter de possible stress dû à une accumulation de sel dans le substrat et/ou un manque de nutriments dans la zone racinaire. La Figure 6 présente un récapitulatif de ces stratégies.

³ Fraction de drainage : ratio entre la quantité de lixiviat et la quantité de solution de fertigation

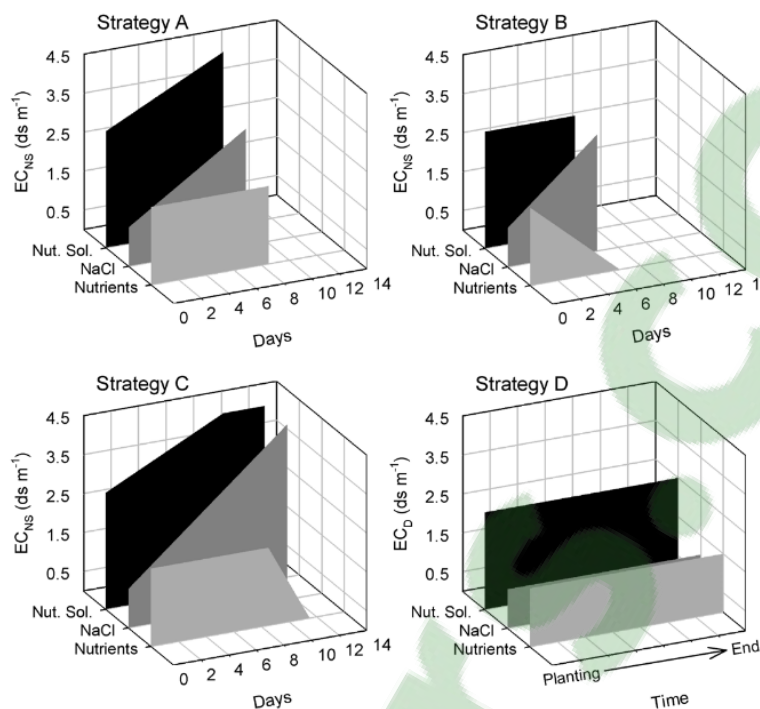


Figure 6 Récapitulatif des stratégies utilisé par Massa, et al. [11]

Il n'y a pas eu de différence significative de la production commercialisable et l'absorption d'eau entre les différentes stratégies. Cependant, la consommation d'eau liée à la stratégie utilisée diffère fortement. Le tableau 3 présente le rendement d'absorption d'eau et de nutriments obtenu pour chaque expérience. La figure 7 présente un graphique des résultats obtenus pour la production de fruits et l'absorption de nutriments et d'eau. Il est possible de constater que la stratégie la plus intéressante est la C puisque cette dernière présente un rendement supérieur aux autres stratégies, car elle permet une assimilation de nutriments et d'eau supérieure aux autres stratégies de l'essai.

Tableau 3 Rendement obtenu pour l'absorption d'eau et de nitrate lors de l'essai de Massa, et al. [7]

Expérience	Élément	Stratégie A	Stratégie B	Stratégie C	Stratégie D
1 (2005)	Eau	64,2%	56.1%	71.6%	33.6%
	Nitrate	72.0%	96.5%	95.4%	41.1%
2 (2006)	Eau	66.9%	62.0%	73.0%	
	Nitrate	70.3%	96.1%	96.5%	

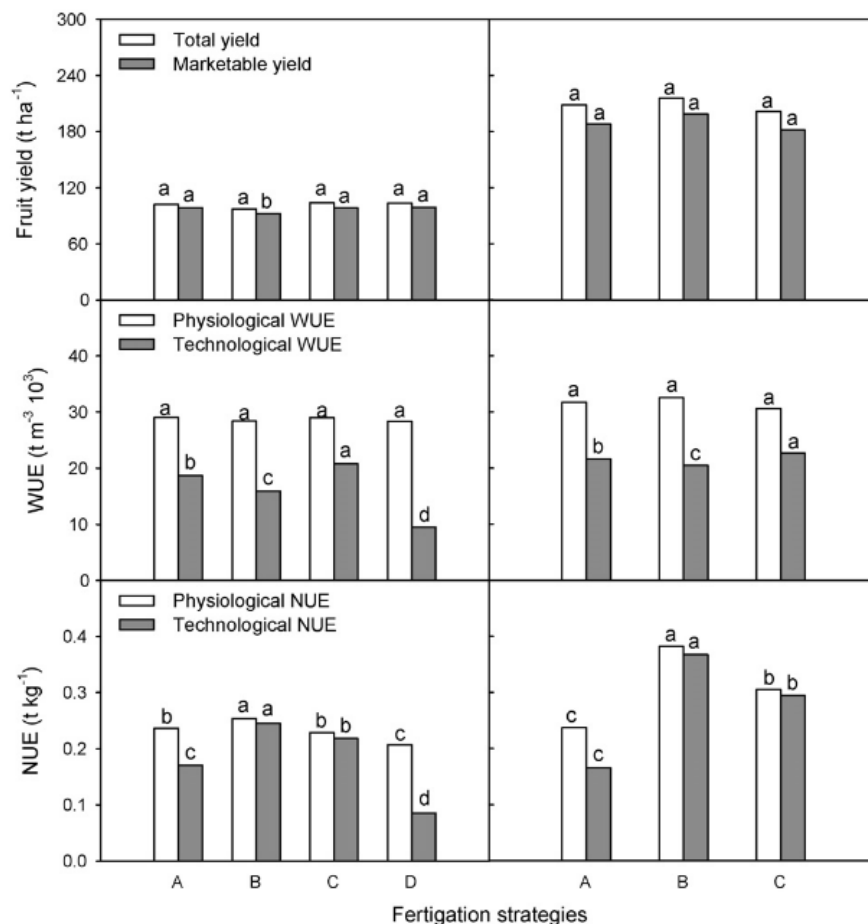


Figure 7 Résultats obtenu par Massa pour la production de fruit, l'absorption d'eau (WUE) et de nutriments (NUE) [7].

Le tableau 4 présente un sommaire des travaux étudiés dans cette section. L'un des principaux problèmes est la vulnérabilité de ces systèmes est qu'ils très sensible à une défaillance des systèmes d'irrigations. La fréquence de ces défaillances varie en fonction de la durée de vie et de l'entretien des équipements utilisés. Pour cette raison, il est fortement recommandé d'utiliser des systèmes plus évolués afin d'effectuer la surveillance en temps réel des pannes du système de maintien de la solution qui pourrait survenir. Des systèmes décisionnels utilisant des réseaux de neurones et des systèmes

experts deviennent de plus en plus courants afin de réagir rapidement pour diminuer les impacts sur la production hydroponique. Ces systèmes sont en mesure de s'adapter rapidement sans ou avec peu d'interventions humaines [13].

Tableau 4 Résumé des stratégies de maintien de la solution nutritive

Auteurs	Description sommaire des travaux et des résultats
Li, et al.	Étude de l'impact de l'EC à proximité des racines. Diminution de la productivité de 5.1% pour chaque dS m-1 au-dessus de 2 dS m-1 [14].
Neto, et al.	Ajustement dynamique de la solution nutritive en fonction du lixiviat du système et de la prédiction de l'évapotranspiration. Diminution de 25% de la quantité d'eau consommée par rapport à un système goutte à goutte standard[7].
Santamaria, et al.	Fertigation à l'aide de système d'irrigation souterraine. Les plants avec ce type d'irrigation ont produit moins de fruits qu'un système goutte à goutte de référence. Cependant, l'efficacité d'absorption d'eau était plus élevée [8].
Carmassi, et al.	Développement de modèle d'absorption d'eau et étude de l'impact d'un ion ballast (sodium) sur la production de la tomate de serre en circuit fluide fermé. Le modèle est suffisamment performant pour être utilisé en industrie. La présence de sodium a eu une influence significative que sur la taille des fruits produits dans leurs essais. [9, 10]
Massa, et al.	Étude de 3 stratégies de maintiens de solution nutritive en utilisant des mesures d'EC et du niveau de nitrate dans un circuit fluide fermé. Ces stratégies ont un rendement sur l'absorption d'eau et de nitrate nettement supérieur à un système goutte à goutte classique [11, 15, 16].

1.3 Technique de surveillance

Il est nécessaire d'effectuer une surveillance constante des systèmes hydroponiques, car une surnutrition ou un manque d'eau peut rapidement survenir et compromettre la production. Les bris de pompe, de système de distribution de nutriments, d'accumulation de sels minéraux ou de biofilm dans les canalisations sont des situations possibles dans ce type d'industrie. Cette section abordera la surveillance à l'aide de l'intelligence artificielle, de la fluorescence de la chlorophylle, du flétrissement du plant, de la spectrométrie par impédance électrique et de la tomographie par impédance électrique.

Plusieurs recherches sont orientées afin d'inclure la plante dans les systèmes de maintien («speaking plant approach- SPA»). Généralement, le module décisionnel de ces systèmes repose sur des techniques d'intelligence artificielle et se décompose en deux sous-modules. Le premier est un système expert. Il permet de fixer les limites physiques des actionneurs et les valeurs d'opération de la concentration en nutriments. Le second est un module pouvant être constitué d'un réseau de neurones, d'algorithmes génétiques, de la logique floue ou un ensemble de combinaisons de ces derniers. Morimoto, et al. [17] ont utilisé des réseaux de neurones afin d'établir un modèle de la culture. L'optimisation des paramètres s'est effectuée à l'aide d'un algorithme génétique afin de déterminer la valeur cible de la teneur en nutriments. Par la suite, ils ont modifié leur stratégie en ajoutant un système permettant d'optimiser le maintien de l'environnement. Ils ont utilisé un réseau de neurones afin d'obtenir le modèle inverse de l'environnement. Par la suite, un algorithme génétique a permis d'optimiser les paramètres du compensateur à base de logique floue [18]. Les figures 8 et 9 représentent le système élaboré. Ces systèmes peuvent s'adapter à une modification de l'environnement puisque ces derniers considèrent la variation des paramètres en utilisant une identification en temps réel.

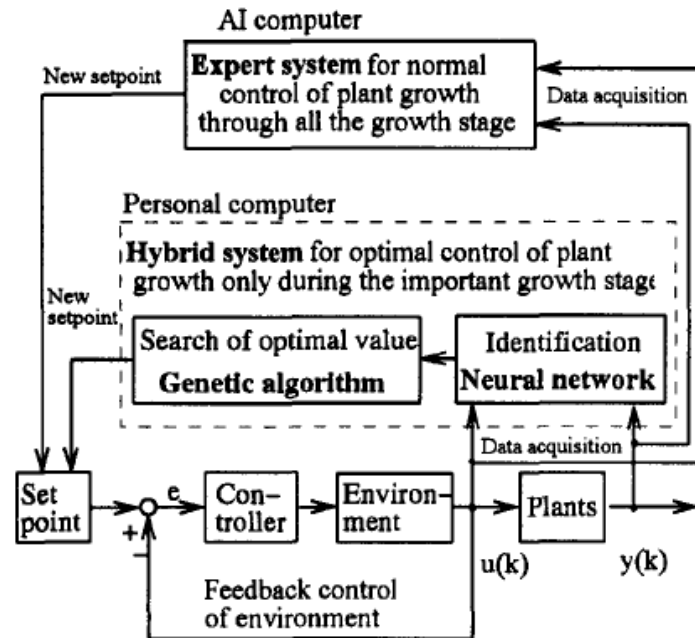


Figure 8 Schéma bloc du système de commande et de contrôle intelligent de Morimoto[17]

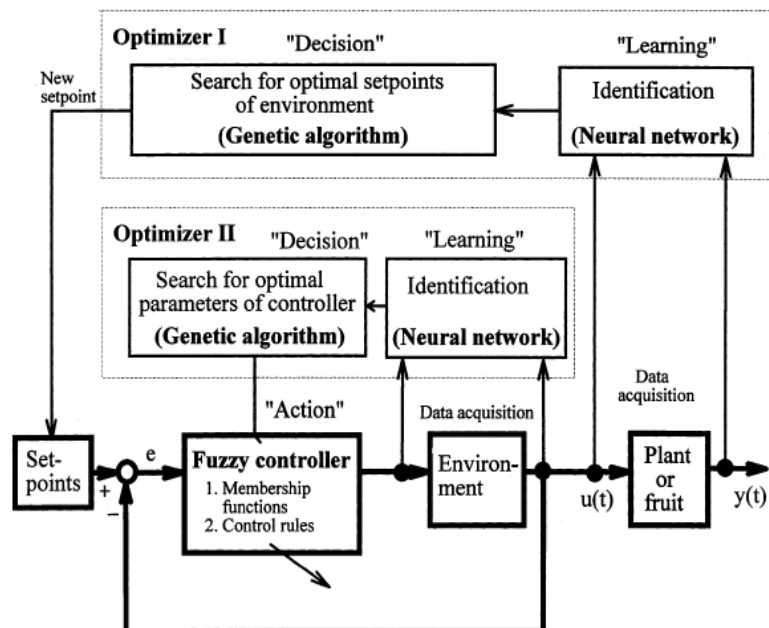
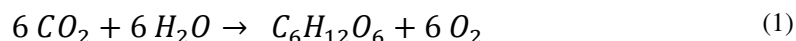


Figure 9 Schéma bloc du système de contrôle de modifier afin d'inclure l'optimisation environnementale[18]

Plusieurs chercheurs ont effectué des travaux de recherches utilisant des techniques d'imagerie afin d'évaluer la condition des plants utilisés dans leur culture. La plupart des méthodes d'analyse rencontrée se basent sur l'effet de Kautsky. Cet effet explique la variation de l'intensité de la fluorescence après qu'une plante ait été privée de lumière, soit par l'activation du processus de la photosynthèse. La photosynthèse est un phénomène photochimique qui permet de fixer le carbone contenu dans le dioxyde de carbone. Ce carbone est utilisé pour la formation de sucres nécessaires au développement de la plante. La réaction chimique générale est la suivante :



Afin que la réaction se produise, il est nécessaire qu'il ait apport d'énergie à la réaction et la présence de chlorophylle [19]. L'apport en énergie s'effectue sous forme lumineuse. Les pics absorptions lumineuses pour cette réaction est de 655 nm et de 450nm. L'énergie est absorbée par les pigments assimilateurs (chlorophylle et caroténoïdes) et transférée via les centres de réaction afin de permettre le transfert d'énergie pour la réaction de la photosynthèse. Cependant, ce n'est pas la totalité de l'énergie qui est utilisée. Il y a plusieurs mécanismes concourants à ce transfert d'énergie tels que la dissipation thermique et la fluorescence de la chlorophylle. La désexcitation des molécules impliquées dans les réactions chimiques de la photosynthèse dissipe l'énergie supplémentaire sous forme de chaleur. La désexcitation des molécules de chlorophylle entrainera un phénomène de fluorescence ayant une longueur d'onde de 650 nm. La

figure 10 présente les divers niveaux d'excitation de départ (S_0) et les niveaux d'excitation impliqués dans les réactions photochimiques (S_1 et S_2) possibles pour la chlorophylle de type A qui est la plus répandue.

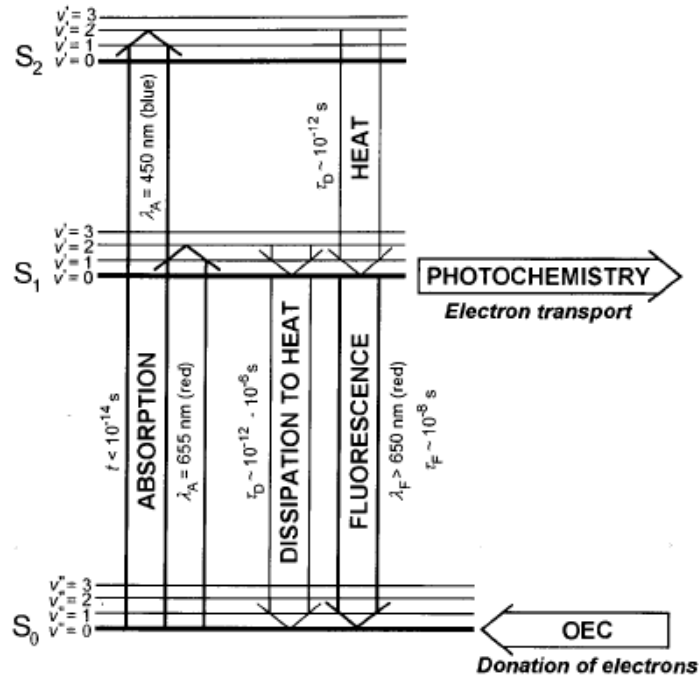


Figure 10 : Distribution de l'énergie [19]

Considérant les diverses réactions nécessaires à l'activation des réactions chimiques impliquées dans la photosynthèse, la puissance de la fluorescence de la chlorophylle va varier avant de se stabiliser. La figure 11 représente cette variation suite à l'exposition à de la lumière. Les points O, I, D, P, S, M et T correspondent à l'activation de divers mécanismes nécessaires à la photosynthèse. La mise en place de ces mécanismes nécessite environ cinq minutes à se stabiliser.

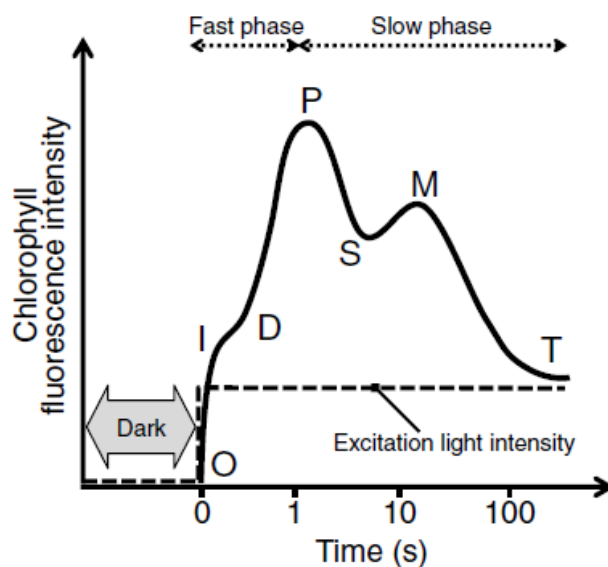


Figure 11 : Courbe de fluorescence typique de la chlorophylle (Nishina [20]).

Les réactions de photosynthèse peuvent être influencées par divers éléments, tels que la température, l'éclairage, le niveau de dioxyde de carbone et la nutrition de la plante. Les sucres obtenus suite à ces réactions sont utilisés, en combinaison avec les nutriments absorbés par les racines, pour créer des composés essentiels au développement de la plante tel que la chlorophylle. La formule chimique de la chlorophylle A est $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ [21] et sa structure moléculaire est présentée à la figure 12. Par conséquent, considérant cette formule chimique, il est nécessaire d'avoir un apport en azote (N) et en magnésium (Mg) provenant généralement du sol ou de la solution nutritive pour sa synthèse.

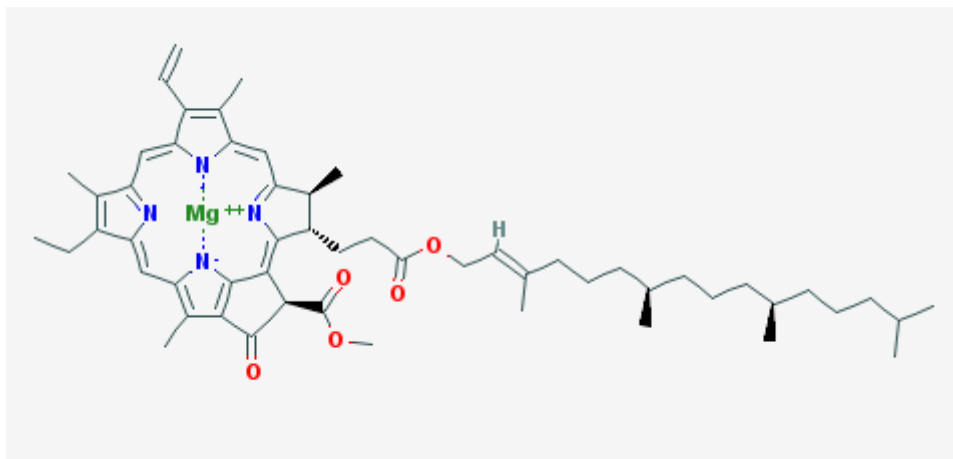


Figure 12 Structure moléculaire de la Chlorophylle A

Borhan, et al. [22] ont démontré qu'un déficit en N entraîne une diminution de la teneur en chlorophylle. Le phénomène de fluorescence a été mesuré à l'aide d'imagerie multi spectrale. Chaerle, et al. [23] ont combiné la fluorescence de la chlorophylle et l'émission thermique afin de détecter les stress biotiques⁴ et abiotiques⁵. D'ailleurs, Davenport, et al. [24] ont démontré qu'il était possible d'observer une variation de la mesure de la réflectance des feuilles de la pomme de terre. La teneur en N observée a une relation linéaire avec la valeur de réflectance observée (figure 13). De plus, ils observent que le moment de la journée où la mesure était prise et l'âge des plants avaient une influence (figure 14).

⁴ Stress biotiques : Stress résultant de l'action néfaste d'un organisme vivant sur un autre organisme vivant tel qu'une attaque d'un pathogène.

⁵ Stress abiotique : Stress résultat d'un changement d'environnement tel qu'une carence en nutriment.

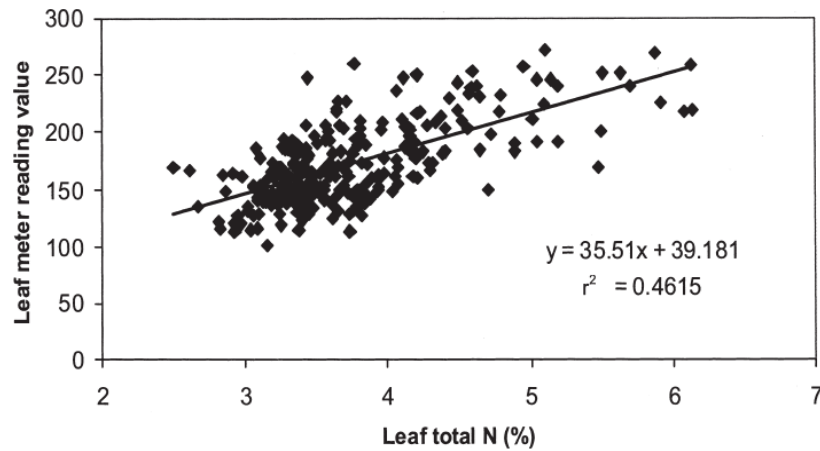


Figure 13: Relation entre la réflectance foliaire mesurée et la concentration en azote foliaire pour la pomme de terre [24].

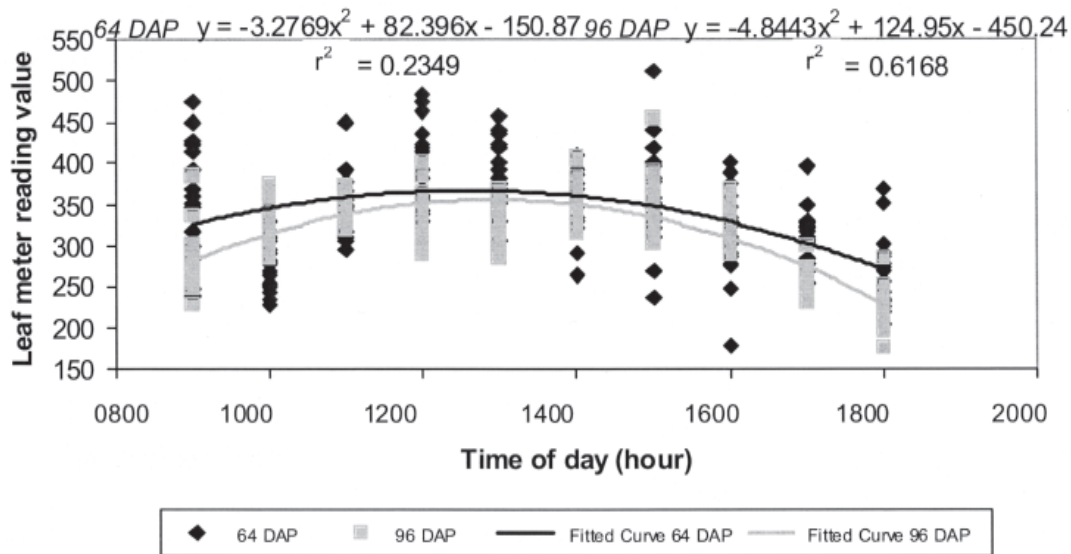


Figure 14 : Relation entre la mesure de la réflectance foliaire et le moment de la journée pour des plants de pommes de terre âgées de 64 DAP et 96 DAP [24].

Nishina [20] a utilisé l'imagerie par fluorescence de la chlorophylle pour quantifier la condition physique de la plante. Pour ce faire, ce dernier utilisa un panneau de DEL bleu pour éclairer le plant de tomates. Contrairement aux techniques fluorescence traditionnelle qui utilisent quelques millimètres carrés pour effectuer l'analyse [25], ce dernier utilisa une caméra équipée d'un filtre qui laisse passer les longueurs d'onde

supérieures à 640 nm. La totalité de la plante a été couverte. Les pigments de chlorophylle absorbent une certaine quantité d'énergie contenue dans le spectre de la lumière bleue afin de l'utiliser dans leurs réactions photochimiques [19, 25]. Suite au balayage complet d'une serre expérimentale, il a dressé une carte des valeurs du rapport P/S obtenues (figure 15). Ce rapport était plus élevé pour la section située au sud de la serre (encerclé en pointillé noir dans la figure 15) que la section du nord, endroit où il y avait un éclairage naturel plus faible. Par conséquent, cela suggère que le niveau d'activité photosynthétique et le rapport P/S sont liés.

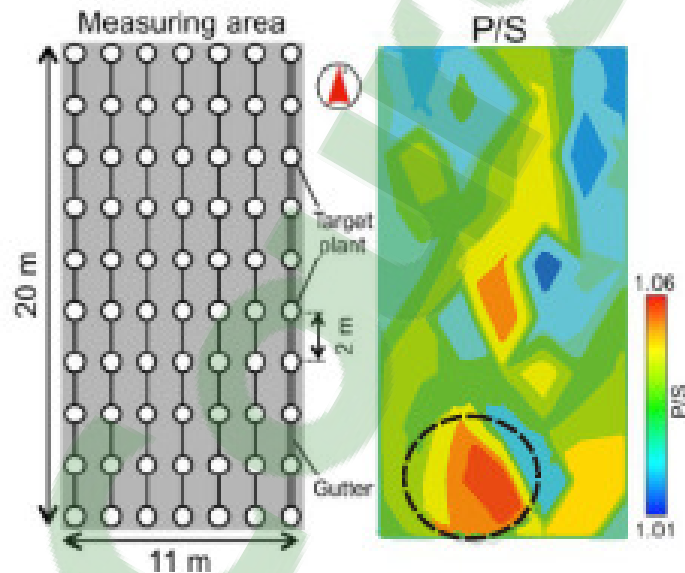


Figure 15 Point de mesure (gauche) et distribution du rapport P/S (Nishina [20]).

Des essais ont été effectués au centre Arthur Clark Mars Greenhouse situé dans le haut cercle polaire canadien. Ces essais ont permis d'évaluer des systèmes de mesures basées sur la fluorescence de la protéine verte afin d'assurer le suivi de la plante dans des milieux hostiles sans qu'il y ait présence d'opérateur [26, 27]. Les données et les commandes étaient envoyées via un lien satellite. Ils ont sélectionné la fluorescence des protéines

comme capteur biologique exprimant la santé des *Arabidosis Thaliana* utilisé dans leur expérimentation. Cette espèce a été sélectionnée car elle est un modèle biologique. De plus cette dernière a déjà été utilisée dans le cadre de recherche de certaines missions spatiales. Leur dispositif utilisait une source d'éclairage ayant entre 300 et 500 nm afin d'obtenir l'excitation nécessaire à la réaction de fluorescence observée. Ils ont conclu qu'il était possible de faire le suivi de leur expérimentation à l'aide d'un système d'imagerie et que cela deviendrait un outil indispensable dans le suivi d'expérimentation autonome dans le cadre des missions spéciales futures.

Plus récemment, une technique de spectrométrie a été utilisée par Lavrov, et al. [28] afin d'évaluer les stress hydriques. La source d'excitation utilisée était une pulsation laser de type YAG ayant une longueur d'onde de 532 nm. Cette technique est connue sous le nom de fluorescence induite par laser (LIF). La figure 16 présente le montage utilisé pour son essai. La fluorescence était captée à l'aide d'un spectromètre optique afin d'obtenir la puissance émise pour chaque longueur d'onde du spectre observé.

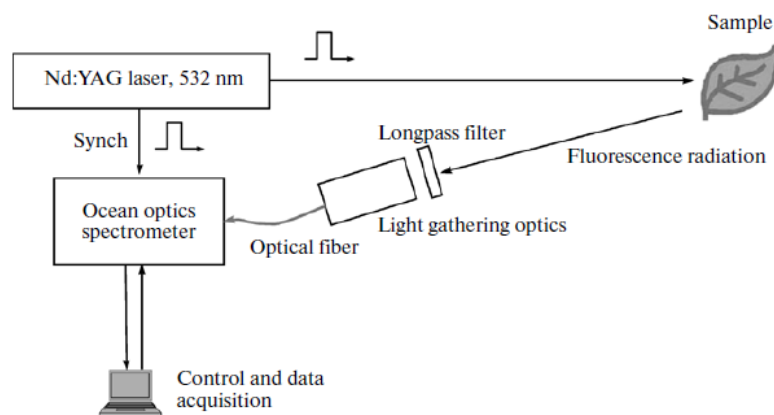


Figure 16 Montage LIF utilisée par Lavrov, et al. [28]

Pour effectuer leur étude, ils ont procédé à la collecte d'aiguille de pin maritime. Ces dernières ne recevaient plus d'eau, elles se sont desséchées les jours suivants. Le résultat de la spectrographie est présenté à la figure 17. Il est possible de constater qu'il y a deux maximas. Ces derniers se situent à 685 nm et 740 nm et leurs amplitudes varient en fonction de la sécheresse de l'échantillon.

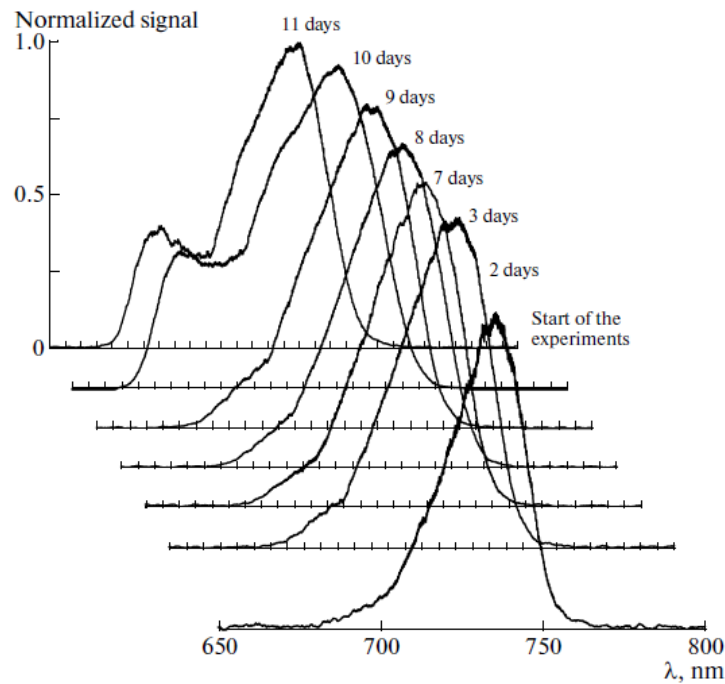


Figure 17 Résultats des spectrographies de Lavrov, et al. [28]

Ahmad, et al. [29] ont utilisé un système de caméra afin de prendre des images à un intervalle de 15 minutes. Par la suite, un logiciel de traitement d'image analysait les données recueillies afin de déterminer le niveau de flétrissement et la hauteur du plant de tomates (figure 18). Ce niveau était évalué par la différence de la largeur des plants. Lorsque ce taux dépassait 2 %, le système commandait un cycle de fertigation de trois minutes. Cependant, pour leur essai, seulement un plant était suivi aux 15 minutes et les

60 autres plants étaient suivis aux deux jours. Pour les 30 premiers jours, ces derniers utilisaient le système de minuterie qui effectuait un cycle de fertigation de trois minutes aux 30 minutes. La consommation de solution nutritive était de $101.6 \text{ l jour}^{-1}$ pour cette période. Pour les 14 jours suivants, leur système de traitement d'image a été utilisé pour commander les cycles de fertigation. La consommation de solution fut de 17.3 l jour^{-1} et de $101.6 \text{ l jour}^{-1}$ pour le reste de l'essai. Leur système de gestion a permis de diminuer de 80 % la consommation de la solution à comparer à un système utilisant une minuterie, et ce, sans impact sur le développement du plant (figure 19).



Figure 18 Mesure du flétrissement de l'essai de Ahmad, et al. [29].

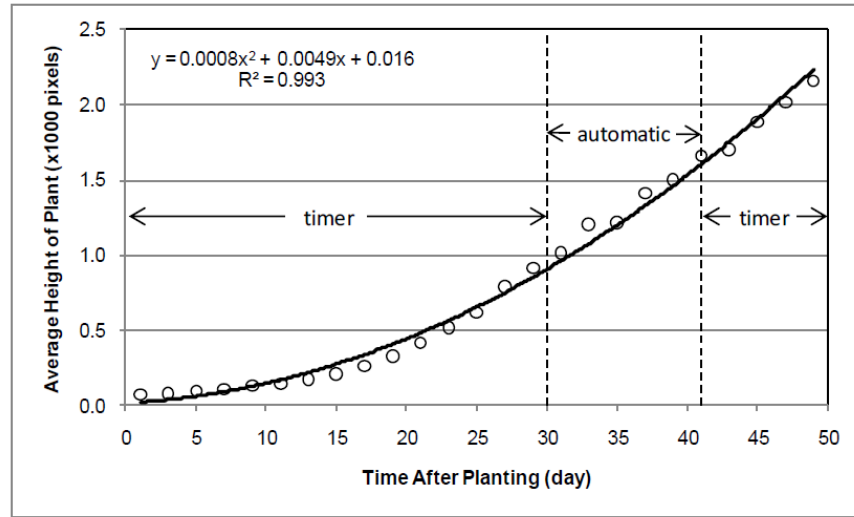


Figure19 Mesure du développement des plants de l'essai de Ahmad, et al. [29]

Certains auteurs utilisent des techniques de mesure des propriétés électriques de la plante, soit la mesure d'impédance électrique de la plante. Cette technique consiste à implanter un dispositif de mesure sur la tige de la plante et d'y faire circuler un courant électrique alternatif. Tomkiewicz [30] propose d'évaluer l'impédance entre 100 Hz et 50 kHz. Cet intervalle est divisé en trois plages ayant des caractéristiques différentes. Dans le premier, entre 100hz et 1.5 kHz, l'impédance est fortement influencée par la polarisation des électrodes du capteur. Dans le second, entre 1.5 kHz et 20 kHz, la polarisation des électrodes devient négligeable et la corrélation entre l'amplitude et un statut nutritionnel déficient devient significative. Le dernier groupe, entre 20 kHz et 50kHz, la dépendance entre l'amplitude et un statut nutritionnel déficient est toujours visible, mais devient complexe à exploiter. La chaine d'acquisition utilisée pour cet essai est présentée à la figure 20.

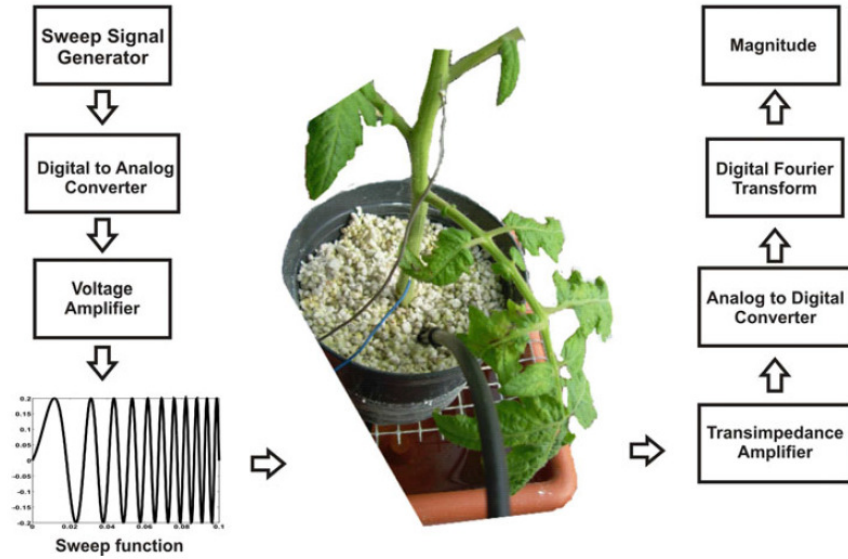


Figure 20 Chaîne de traitement de Tomkiewicz and Piskier [30]

La méthode d'analyse proposée repose sur un indicateur appelé vecteur d'index de nutrition ($P(k)$). Ce dernier représente la moyenne des différences des amplitudes mesurées pour une plage de fréquence donnée. Les coefficients de corrélation obtenue suggèrent qu'il ait une dépendance statistique entre l'index de nutrition et le déficit en nutriments. L'équation (2) présente l'expression mathématique de cet indice :

$$P(k) = \frac{\sum_{n=n_L}^{n_H} (V_n(k) - V_n(0))}{n_H - n_L}, \quad (2)$$

où k est le nombre de jours depuis le début de l'expérience, n_L est l'élément vectoriel correspondant à 5 kHz, n_H est l'élément vectoriel correspondant à 16 kHz et $V_n(k)$ est la valeur de l'amplitude de l'élément n à la journée k de l'expérience.

L'essai consistait à comparer deux groupes de plants de tomates ayant une solution nutritive différente. Dans la première phase de l'essai, les plants du groupe A avaient une solution nutritive pauvre en nutriments et ceux du groupe B avait une solution nutritive adéquate. Pour la seconde phase, les solutions nutritives ont été interchangées. La figure 21 présente la variation de l'indice $P(k)$ au cours de l'essai. Il est possible de distinguer une différence significative entre les indices des deux phases.

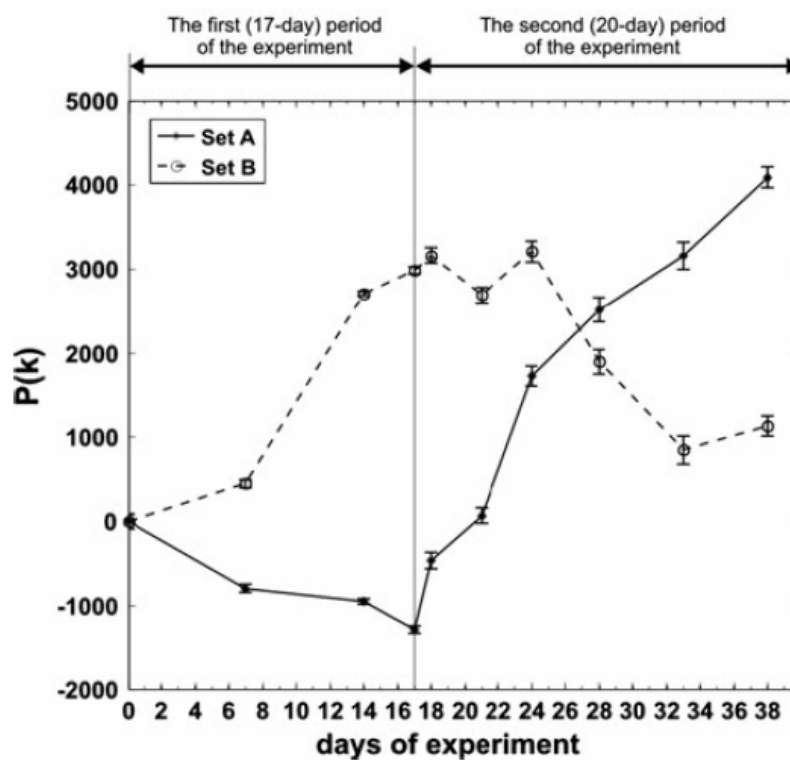


Figure 21 Changement de l'index $P(K)$ durant les essais de Tomkiewicz and Piskier [30]

Munoz-Huerta [31] a validé qu'il était possible d'utiliser la mesure de l'impédance électrique afin d'évaluer un déficit en N de la laitue. La figure 22 présente un exemple de mesure pour cet essai. Ce dernier était composé de 4 groupes de laitue. La teneur en N de la solution a été modifiée afin d'obtenir 100 %, 75 %, 50 % et 25 % de la valeur cible

d'une solution de Steiner. Les résultats obtenus ont démontré qu'il était possible d'observer une corrélation linéaire entre la fréquence du minimum de phase et la teneur en N de la solution nutritive indépendamment de l'âge de la culture (figure 23).

Les techniques de mesure des propriétés électriques entraînent un stress biotique. En effet, la plante réagit à l'implantation du dispositif de mesure, car ce dernier endommage les cellules végétales lors de son insertion. L'un des principaux mécanismes est la mort programmée des cellules lorsque ces dernières ne sont plus utiles ou endommagées [32]. Par conséquent, l'insertion d'un dispositif de mesure modifie l'état du plant. De plus, il existe un risque de propagation de ravageurs⁶ et de maladies si le dispositif est déplacé d'un plant à l'autre [33, 34].

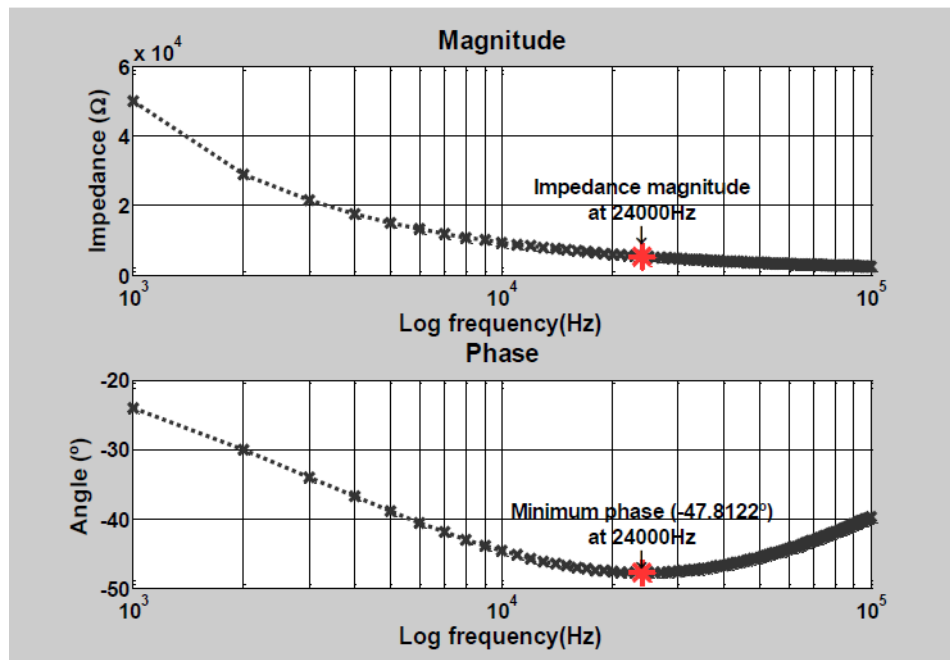


Figure 22 Exemple de mesure prise par Munoz-Huerta [31]

⁶ Ravageurs : Organismes animaux qui attaquent les plantes cultivées ou les récoltes stockées.

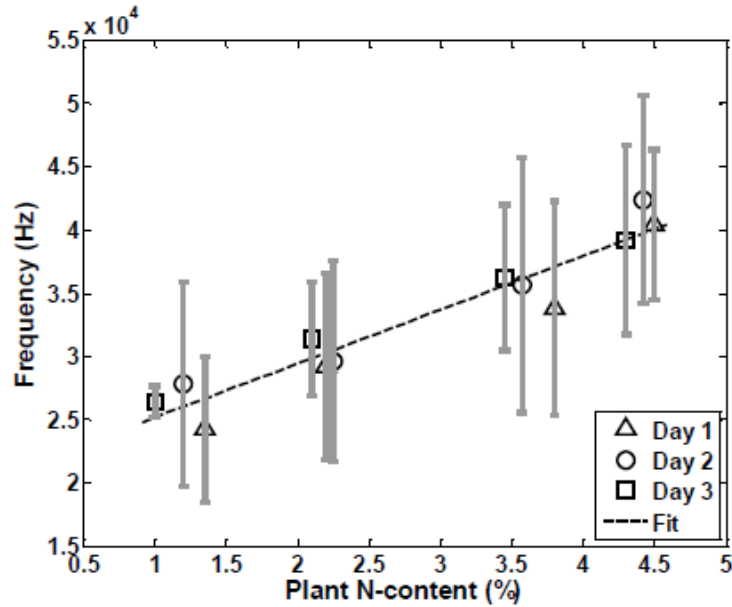


Figure 23 Relation entre la fréquence du minimum de phase et la teneur en azote obtenu par Munoz-Huerta [31]

Afin d'éviter ce contact physique avec la plante, l'utilisation de tomographie par impédance électrique pourrait être utilisée. La tomographie consiste à reconstruire un volume d'un objet à l'aide d'une série de mesure effectuée par tranche, soit l'impédance électrique dans le cas présent. Cette technique d'imagerie est généralement utilisée dans le milieu médical. Lee, et al. [35] ont développé un système de tomographie 3D à impédance électrique afin d'évaluer le développement de tissus biologiques. L'appareil consistait à placer l'échantillon à analyser à l'intérieur d'un champ électrique alternatif de 1kHz et de mesurer la fluctuation de ce dernier à l'aide de capteur de tension à des positions fixes. La figure 24 présente le concept de l'appareil.

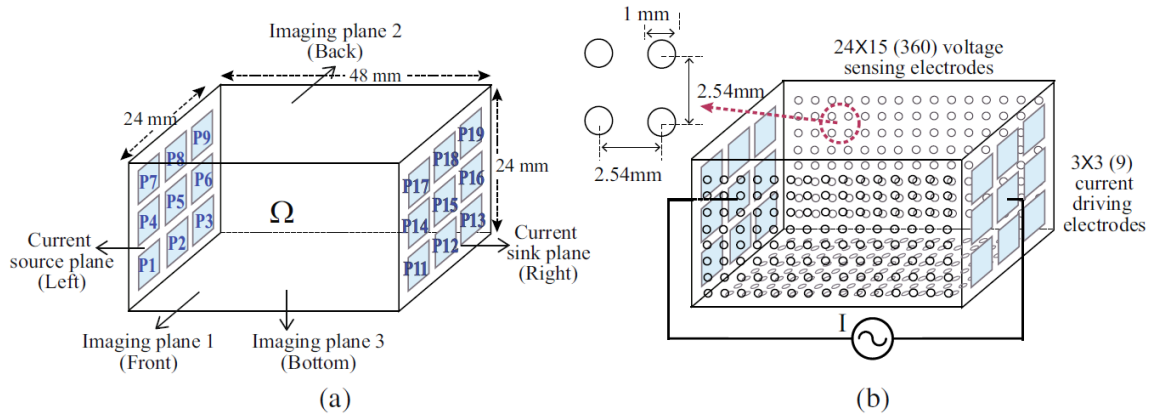


Figure 24 Design du dispositif de Lee, et al. [35] (a) positionnement des électrodes d'excitation (b) position des capteurs de tension électrique

Les essais ont été effectués à l'aide de matière biologique, soit de pommes de terre, de radis et de carottes. Une reconstitution 3D des éléments a été possible à l'aide des mesures effectuées (figure 25). Par conséquent, s'il est possible d'observer un changement d'impédance lors de mesure avec contact [30, 31], ce type de tomographie pourrait être adapté afin d'être utilisé pour détecter les déficits nutritionnels à l'aide de la spectrométrie par impédance électrique sans qu'il y ait contact avec les plantes.

En bref, le tableau 5 présente un sommaire des travaux de recherche expliqués dans ce sous-chapitre. Plusieurs de ces techniques pourraient être utilisées afin d'effectuer le suivi et la surveillance de culture hydroponique avec une solution recirculée.

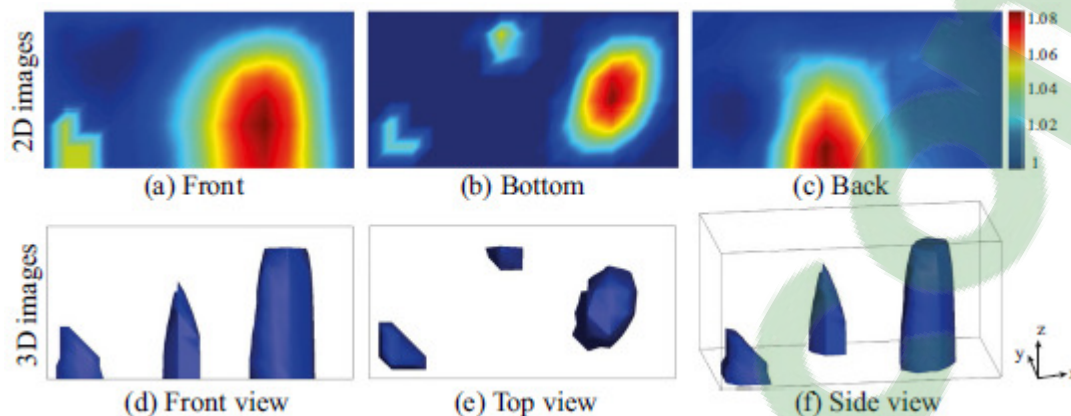


Figure 25 Reconstitution 3D à partir des mesures de champs électriques en 2D [35]

Tableau 5 Résumé des techniques de surveillance

Auteurs	Description sommaires des travaux et des résultats
Morimoto, et al	Utilisation d'intelligence artificielle afin de déterminer les consignes optimales environnementales [17, 18].
Borhan, et al.	Mise en évidence de la corrélation linéaire entre la teneur en azote foliaire et la réflectance foliaire. Cette corrélation varie en fonction du moment de la journée où la mesure est prise [22].
Nishina	Évaluation de l'utilisation de la fluorescence de la chlorophylle afin d'évaluer un déficit en éclairage naturel en serre. Il a conclu qu'il avait une différence entre les plants de tomates situés sur la face sud et au nord de la serre expérimentale, soit en fonction de l'éclairage naturel [20].
Abboud, et al.	Utilisation de la fluorescence de la protéine verte afin d'effectuer le suivi de la plante en milieux hostiles sans qu'il y ait présence d'opérateur. Leur installation se situe dans le haut cercle polaire canadien et l'entretien et la mise à niveau des équipements s'effectuent seulement 1 fois par année [26, 27].
Lavrov, et al.	Étude de l'utilisation de la LIF afin de détecter le stress hydrique par une variation de l'étude spectrale de la fluorescence[28].
Ahmad, et al.	Utilisation de l'imagerie afin de commander un cycle de fertigation en fonction d'un seuil de flétrissement maximal [29].
Tomkiewicz	Utilisation de la spectrométrie par impédance électrique afin d'évaluer le statut nutritionnel du plant de tomates. L'utilisation de la moyenne des différences d'amplitudes mesurées a permis de mettre en évidence qu'il avait une différence significative entre les groupes de plantes ayant une nutrition adéquate et inadéquate [30].
Munoz-Huerta	L'évaluation de l'impédance électrique de la laitue a permis d'observer une variation de la fréquence du minimum de phase en fonction du statut nutritionnel des plants [31].
Lee, et al.	Développement d'un système tomographique 3D basé sur l'impédance électrique pour faire le suivi du développement de tissu in vitro. L'utilisation de légume dans leur essai permet de croire que le procédé pourrait être adapté afin de détecter un déficit nutritionnel [35].

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, un aperçu des stratégies de maintiens de la solution nutritive et des techniques de surveillance ont été abordées. Dans un premier temps, il a été démontré qu'il était possible d'utiliser un circuit fluidique semi-fermé avec diverses stratégies afin de minimiser les impacts environnementaux et d'augmenter le rendement en eau et en nutriments. Dans un second temps, il est possible d'utiliser des données provenant des plants afin de déterminer les paramètres environnementaux optimums. Cependant, l'utilisation de donnée provenant directement des plants amélioreraient considérablement les prédictions et les systèmes actuels. Nishina[20] a démontré que la fluorescence de la chlorophylle permettait d'observer une différence d'éclairage naturel dans une serre expérimental de tomate. Abboud, et al ont utilisé la fluorescence de la protéine verte afin d'évaluer la santé global d'*Arabidosis Thaliana*. Or, dans le cadre de ce projet, la fluorescence de la chlorophylle a été retenue. De plus, aux meilleurs de nos connaissances lors de la rédaction de ce document, aucuns système de n'utilisait cette mesure afin d'évaluer le statut nutritionnel des plants de tomates de serre. En effet, cette dernière est non invasive et non destructive. Elle demeure suffisamment simple afin de permettre une mise en œuvre à des faibles coûts.

Enfin de développer un système de mesure dédié à nos travaux de recherche, le chapitre suivant développera une modélisation d'une serre hydroponique avec la solution nutritive recirculée. À partir de ce modèle, un montage expérimental est conçu afin de valider l'instrument de mesure sélectionné (utilisé pour évaluer la fluorescence de la chlorophylle).

Chapitre 2

Conception et réalisation du montage expérimental

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, les diverses stratégies de maintien de la solution nutritive en système ouvert et fermé ont été abordées ainsi que les techniques de surveillance. Plusieurs auteurs ont proposé des stratégies de maintien afin d'augmenter le rendement (taux de recouvrement) en eau et en nutriments. Pour tous les cas, le suivi de l'évolution de la solution nutritive est un paramètre important car ce dernier a un impact direct sur l'optimisation de la croissance et du rendement en quantité de tomates commerciales produites. Par conséquent, plusieurs chercheurs tentent de développer une méthode de surveillance du statut nutritionnel afin de diminuer une perte de production suite à une défaillance du système de maintien de la solution.

Dans ce chapitre, on propose une modélisation d'un système hydroponique à circuit fluide fermé avec des compensateurs de niveau d'eau et de nutriments afin d'établir les paramètres importants dans un système de surveillance. En particulier, l'eau est généralement absorbée plus rapidement que les nutriments, car environ 90 % de la consommation d'eau de la plante est perdue par évapotranspiration [9]. La concentration en nutriments et le stress hydrique ont un impact significatif sur la production commercialisable et sur la qualité des tomates produites. Ce chapitre traitera ces problématiques.

La première partie de ce chapitre présente la modélisation d'un système hydroponique à circuit fluide fermé. Par la suite, la seconde partie aborde les montages expérimentaux effectués afin d'évaluer le système de surveillance élaboré.

2.2 Modélisation d'un système hydroponique à circuit fluide fermé

Afin de comprendre les paramètres d'un système de surveillance des plantes, il a été nécessaire d'effectuer la modélisation d'un système hydroponique à circuit fluide fermé. Cette démarche a permis de mettre en évidence la dynamique de ce système. Pour ce faire, la modélisation du comportement d'absorption d'eau et de nutriments des plants de tomates a été effectuée. Par la suite, la modélisation du système fermé (fluide) avec et sans compensateurs de niveau d'eau et de nutriments a été complétée afin de démontrer qu'il est possible de maintenir ces taux constants afin d'augmenter la durée de vie de la solution. Le système élaboré a été simulé afin de comparer le comportement du système avec et sans compensateur sur la masse d'eau et la concentration en nutriments contenu dans le système.

2.2.1 Modélisation du comportement d'absorption

Pour débiter, l'absorption d'eau et de nutriments durant le processus de croissance a été étudiée. Pour ce faire, des modèles intermédiaires tels que l'indice de surface foliaire et de production de matière sèche ont été établis puisque la modélisation de la consommation d'eau et de nutriments du plant de tomates est dépendant de ces facteurs.

Modèle de l'indice de surface foliaire (LAI)

Cet indice représente la surface foliaire du plant (m^2) par surface occupée par le plant (m^2). Le calcul de ce dernier a été nécessaire puisque la modélisation de la consommation

d'eau et de nutriments l'utilise. Il a été modélisé par une fonction sigmoïde [10, 15] présentée par l'équation (3) :

$$LAI(t) = a + \frac{b-a}{1+\exp\left(\frac{c-AGDD(t)}{d}\right)}, \quad (3)$$

où a, b, c et d sont des constantes de modélisation. AGDD représente les jours-degré accumulés, soit l'accumulation des moyennes de température journalière depuis la transplantation. L'indice de surface foliaire influence la consommation d'eau et la consommation de nutriments puisque ce dernier est directement lié à la surface d'échange.

Modèle de la production de matière sèche (DM)

La production de matière sèche (g m^{-2}) représente la croissance du plant de tomates. Cette production a été modélisée par Chen, et al. [36] et se définit par (4) :

$$DM(t) = b_1 \sqrt{\frac{LAI(t)}{a_1}}, \quad (4)$$

où a_1 et b_1 sont des constantes de modélisation. Cette production de matière sèche (DM) est utilisée dans la modélisation de consommation de nutriments.

Modèle de la consommation d'eau (Wu)

La consommation d'eau ($\text{kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) des plants de tomates a été modélisée par une fonction exponentielle telle que proposée par [10, 15] et est défini par (5) :

$$W_u(t) = A(1 - \exp(-k * LAI(t))) \frac{R}{\lambda} + B, \quad (5)$$

où R est la radiation solaire reçue à l'intérieur de la serre (Mj m⁻²), λ la chaleur latente d'évaporation de l'eau (2.4 Mj kg⁻¹), A (adimensionnel) et B (kg m⁻²) sont des constantes de modélisation et k, le coefficient d'absorption de lumière de la canopée⁷. Ce modèle est utilisé comme perturbation dans la simulation du système fluidique fermé.

Modèle de la consommation de nutriments (Nu)

La modélisation de la consommation de nutriments (g m⁻² d⁻¹) est la dérivée mathématique de la production de matière sèche et est défini par (6) :

$$N_u(t) = (1 - p) \frac{d(DM(t))}{dt}, \quad (6)$$

où p est la proportion de carbone fixé par la plante, car cet élément ne provient pas de la solution nutritive, mais du dioxyde de carbone contenu dans l'air. Ce modèle est dérivé de la loi de la conservation de la matière. Nous supposons que tous les éléments, excepté le carbone, proviennent de la solution nutritive. Ce modèle est utilisé comme perturbation dans le système asservi.

2.2.2 Modélisation du système asservi du système fluidique fermé

La figure 26 présente le système fluidique fermé modélisé. La totalité de la solution nutritive est recirculée afin de réduire la consommation d'eau et de nutriments concentrés. Le gradient de concentration entre le banc de culture et le réservoir de

⁷ canopée :Strate supérieur d'un couvert forestier directement influencé par le rayonnement solaire

solution recirculé a été supposé négligeable dans l'étude puisque la pompe de recirculation possède un débit suffisamment élevé pour homogénéiser la concentration de ces deux réservoirs.

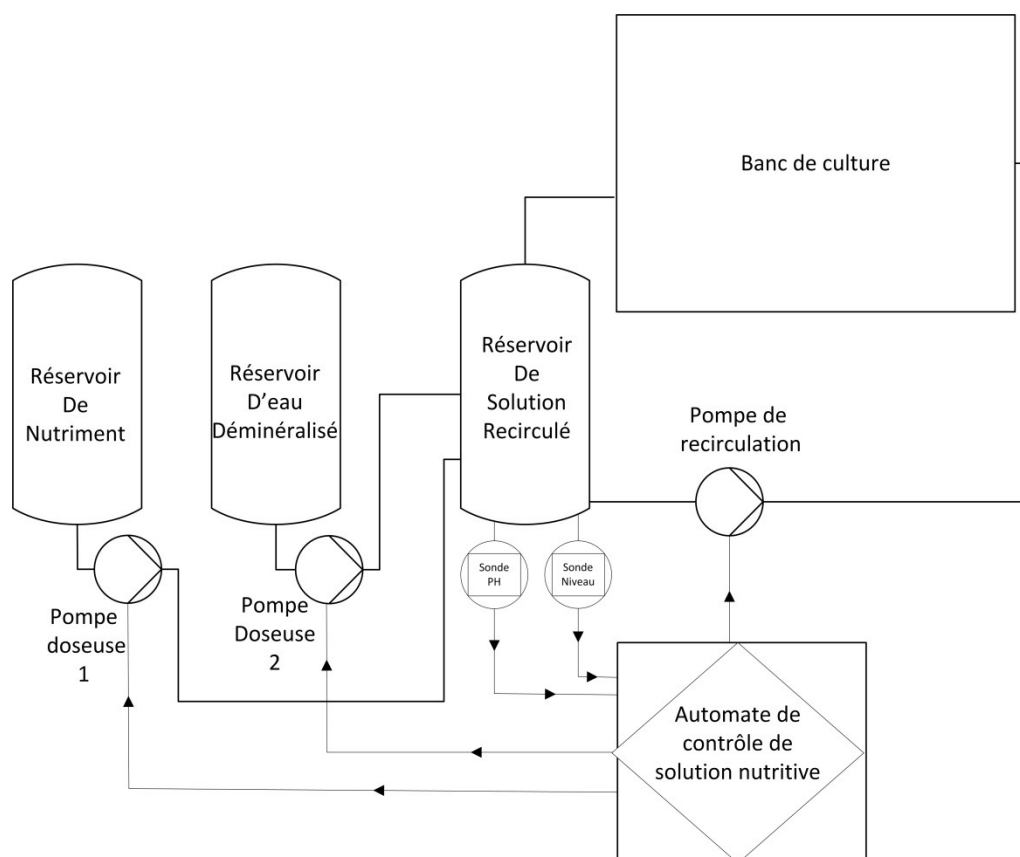


Figure 26 Schématique du système fluide fermé étudié

Cette approche implique d'ajuster la concentration de nutriments dans la solution et le volume de solution. La concentration est influencée par la masse d'eau dans le système fluide fermé puisque la consommation d'eau n'est pas proportionnelle à la consommation de nutriments. Afin de maintenir une masse d'eau et de nutriments constant, une analyse séparée de ces deux paramètres a été effectuée. L'ajustement

s'effectue à l'aide des données recueillies par des capteurs de niveau et de conductivité située dans le réservoir de solution. Comme cela a été étudié dans la revue de la littérature, on suppose que la concentration de nutriments est proportionnelle à l'électro conductivité. La figure 27 présente le schéma d'asservissement de la concentration en nutriments de la solution et la figure 28, le schéma d'asservissement de masse d'eau dans le système.

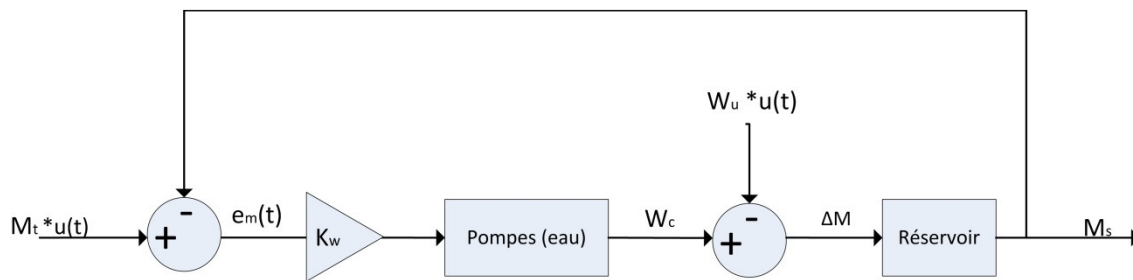


Figure 27 Schémas d'asservissement de la masse d'eau

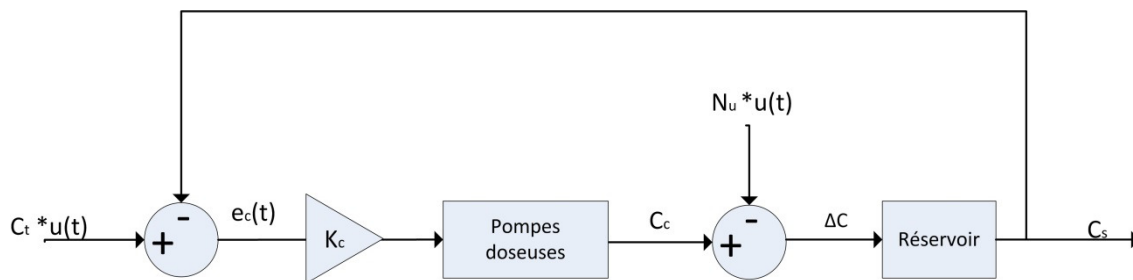


Figure 28 Schémas d'asservissement de la concentration en nutriments

Afin d'obtenir les fonctions de transfert en boucle fermée pour le système asservi (consignes en concentration et en masse), nous avons utilisé une régulation de type proportionnel (P). Ce type de régulateur est l'un des plus simples à utiliser. Dans ce

système, il n'est pas nécessaire de compenser la dynamique avec une dérivée et il n'est pas nécessaire de tendre l'erreur vers zéro avec une intégrale. Un régulateur proportionnel est généralement utilisé afin de compenser des procédés lents. Les autres types de régulateurs, soit proportionnel-intégral (PI), proportionnel-dérivé (PD) et proportionnel intégral dérivé (PID), modifie la dynamique du système. Ces modifications peuvent engendrer des dépassements de consigne. Cela affecterait la capacité des plants à absorber les nutriments de manière irréversible puisque la valeur de consigne de concentration de nutriments est très près de la valeur de concentration maximale admissible. Les équations (7) et (8) représentent les dynamiques du système.

$$M_s(s) = \frac{k_w M_t(s) - W_u}{s + k_w}, \quad (7)$$

$$C_s(s) = \frac{K_c C_t(s) - N_u(s)}{M_s(s)s + K_c}, \quad (8)$$

Noter que l'équation (8) de la concentration en nutriments (C_s) dans le circuit fluidique fermé est un système non linéaire dû à la nature du calcul de la concentration. Ce dernier est le rapport de la masse total de nutriments sur la masse d'eau totale du système. Il est possible d'isoler l'influence de la consommation d'eau ($W_u(t)$) et de nutriments (N_u) pour ces deux systèmes. Par la suite, une évaluation autour d'un point d'opération permet d'isoler les valeurs des gains proportionnels des régulateurs. Cela permet de maintenir la solution nutritive autour de ce point. Afin de calculer ces gains, W_u et C_u représentent le maximum de chaque perturbation. De cette manière, cela simplifie le calcul des gains et

permet d'évaluer le pire cas. Le calcul du gain pour l'asservissement de la masse d'eau est le suivant:

$$M_p(s) = \frac{-W_u(s)}{s+k_w} \text{ et} \quad (9)$$

$$\Delta M_{max} = \lim_{s \rightarrow 0} s M_p(s) = \left| \frac{-W_u}{k_w} \right|, \quad (10)$$

ce qui donne le résultat pour k_w :

$$k_w = \frac{W_u}{\Delta M_{max}}, \quad (11)$$

Le calcul pour du gain pour l'asservissement de la concentration de nutriments est le suivant:

$$C_p(s) = \frac{-N_u(s)}{M_s(s)s+K_c} \text{ et} \quad (12)$$

$$\Delta C_{max} = \left| \lim_{s \rightarrow 0} s C_p(s) \right| = \left| \frac{-N_u}{K_c} \right|, \quad (13)$$

ce qui donne le résultat pour k_c :

$$k_c = \frac{N_u}{\Delta C_{max}}. \quad (14)$$

Enfin, le lecteur peut prendre note que le terme responsable de la non-linéarité du système n'influence pas le régime stationnaire. À l'aide de ces équations, il est possible de simuler le système fluide fermé afin d'estimer sa performance.

2.2.3 Simulation du système asservi

La simulation de la boucle fermée asservie a été effectuée à l'aide d'un script Matlab. Les tableaux de 6 à 10 présentent les paramètres utilisés pour la simulation.

Tableau 6 Paramètre de la serre simulé

Paramètre	Valeur
Surface (m ²)	30
M _t (kg)	9000
C _t (mg kg ⁻¹)	836
ΔC _{max} (mg kg ⁻¹)	44.8
ΔM _{max} (kg)	450

Tableau 7 Paramètre du modèle d'indice de surface foliaire (LAI) [15]

Paramètre	Valeur
a	-0.335
b	4.803
c	755.3
d	134.7
T _{base}	8
T _{min}	25
T _{max}	25

Tableau 8 Paramètre du modèle production de matière sèche (DM) [36]

Paramètre	Valeur
a ₁	0.946
b ₁	0.188

Tableau 9 Paramètre du modèle de la consommation d'eau (W_u) [15]

Paramètre	Valeur
R	7
λ	2.45
A	0.946
B	0.188
k	0.96

Tableau 10 Paramètres du modèle de consommation de nutriments (N_u)[37]

Paramètre	Valeur
p	0.44
Δt	1

En utilisant ces paramètres pour les modèles établis précédemment, les équations pour la simulation sont présentées ci-dessous. Pour le modèle d'indice de surface foliaire, nous obtenons:

$$LAI(t) = -0.335 + \frac{5.138}{1 + \exp\left(\frac{755.3 - AGDD(t)}{134.7}\right)}, \quad (15)$$

où les jours-degré accumulé ($AGDD(t)$) est exprimé par:

$$AGDD(t) = \sum_{t=0}^t (17) + 400. \quad (16)$$

Pour le modèle de la production de matière sèche(DM), nous obtenons:

$$DM(t) = \frac{0.188 \sqrt{LAI(t)}}{\sqrt{0.946}}. \quad (17)$$

Pour modèle de la consommation d'eau (W_u), nous obtenons:

$$W_u(t) = 0.946(1 - \exp(-0.96 LAI(t))) \frac{7}{2.45} + 0.188, \quad (18)$$

où la consommation maximal d'eau (W_u) est:

$$W_u = 3.6 \text{ kg h}^{-1}. \quad (19)$$

Considérant que le simulateur utilise un temps discrétisé, le modèle de la consommation de nutriments (N_u) a été approximé de manière numérique à l'aide de la dérivée arrière de premier ordre et est défini par l'équation (20). Veuillez prendre note que Δt a été fixé à 1h dans la simulation. Cet intervalle est suffisamment petit à comparer au temps total de simulation pour approximer un système continu.

$$N_u(t) = (1 - p) \frac{d(DM(t))}{dt} \cong (1 - p) \frac{DM(t+\Delta t) - DM(t)}{\Delta t}, \quad (20)$$

où nous obtenons l'expression suivante:

$$N_u(t) \cong 0.66(DM(t + 1) - DM(t)), \quad (21)$$

et la consommation maximale en nutriments (N_u):

$$N_u \cong 191.5 \text{ g h}^{-1}. \quad (22)$$

Les valeurs des gains pour les régulateurs de niveau d'eau et de la concentration en nutriments sont calculées à partir des paramètres de la serre simulés et de la consommation maximale d'eau et de nutriments.

Pour le gain du régulateur de la masse d'eau, nous obtenons:

$$k_w = \frac{W_u}{\Delta M_{max}} = \frac{3.6}{450} = 0.008, \quad (23)$$

et pour le régulateur de la concentration en nutriments :

$$k_c = \frac{N_u}{\Delta C_{max}} = \frac{191 \ 500}{44.8} = 4274.5. \quad (24)$$

La figure 29 présente la consommation d'eau et de nutriments du système simulé. La consommation d'eau tend à devenir constante après 1000h, soit 41 jours, après la transplantation. Cela s'explique par le fait que la période de croissance tire à sa fin et le de développement foliaire est terminé. Le pic de consommation de nutriments représente la période où la croissance des plants de tomates est à son maximum. Ce dernier se situe à 808h, soit environ 33 jours, après transplantation. Ces consommations sont traitées comme des perturbations qui affectent le système fluide fermé comme le montre les figures 27 et 28.

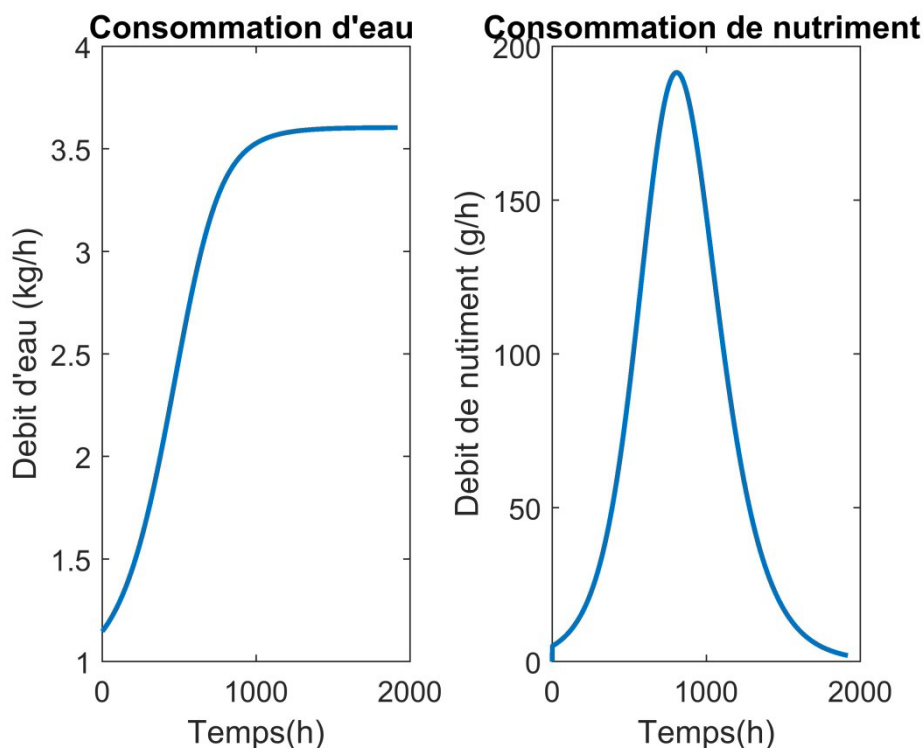


Figure 29 Graphique des perturbations dans le système simulé

Les valeurs des consommations en nutriments et en eau au début de la simulation ne sont pas nulles puisque le simulateur prend en considération que les plants ont été transplantés dans le système. Par conséquent, la valeur de AGDD(0) a été ajustée afin de compenser ce délai [15]. Les résultats obtenus sont dans une plage de valeur acceptable pouvant être

compensée par des équipements standards utilisés en industrie. Les figures 30 et 31 démontrent l'efficacité du compensateur proportionnel du système asservi par rapport à un système sans compensateur.

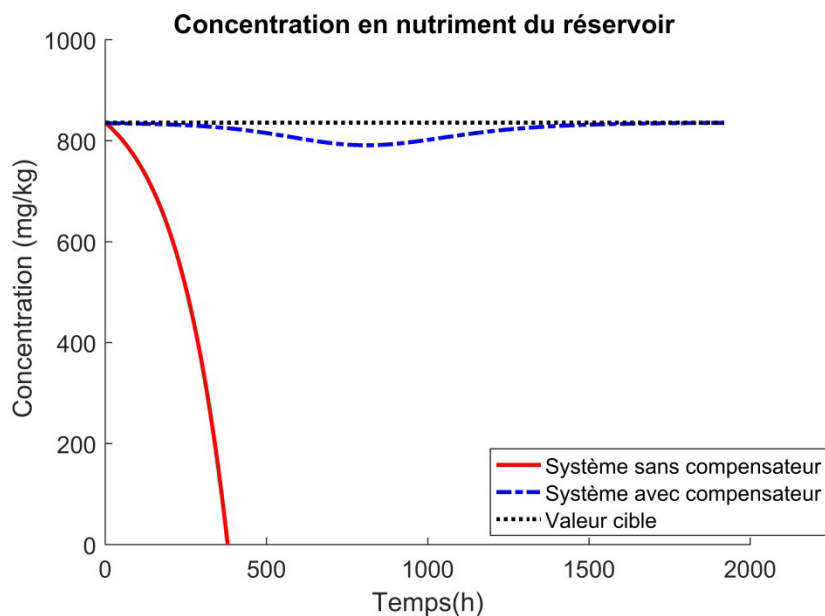


Figure 30 Comparaison entre les sorties du système avec et sans compensateur pour la concentration en nutriments du système simulé

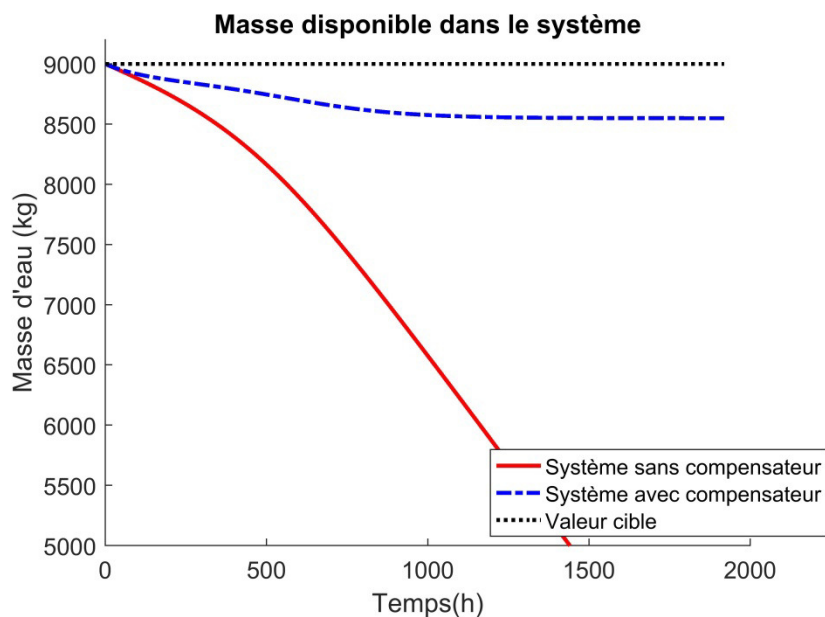


Figure 31 Comparaison entre les sorties du système avec et sans compensateur pour la masse d'eau du système simulé

Dans le cas du système avec compensateur, les valeurs de concentration de nutriments et de masse d'eau du système se maintiennent à l'intérieur de la plage des valeurs désirées (M_t et C_t). Le creux sur la courbe de la concentration en nutriments de la figure 30 représente le moment où la croissance du plant est à son maximum. Cependant, dans le cas du système sans compensateur, ces valeurs divergent. Ces résultats présentent la viabilité théorique d'un système hydroponique à système fluide fermé.

La consigne de concentration est fixe dans ce système. Elle peut être ajustée en fonction de la phase de croissance du plant. En période de forte croissance, soit à 808h, l'absorption de nutriments est à son maximum (191.5 g h^{-1}). Dans le cas d'une défaillance du système de compensation, le temps avant que les nutriments disponibles dans le réservoir soient totalement absorbés est d'environ 37h et aurait un impact important sur l'optimisation de la croissance et de la production de tomates commercialisables. Par conséquent, il est nécessaire de développer et optimiser une technique de surveillance afin d'éviter ces problèmes.

2.3 Description du montage expérimental

Dans le cadre de ce projet de recherche, une exploration des techniques d'évaluation du statut nutritionnel des plants de tomates a été effectuée. Afin de répondre à la problématique, deux montages ont été fabriqués afin d'évaluer le potentiel de chacun. Les premières parties de cette sous-section traiteront des aspects techniques de ces montages. Par la suite, considérant l'utilisation de plusieurs caméras dans le montage final, une

procédure de calibration des caméras a été élaborée afin que les résultats obtenus soient comparables pour chacune des caméras.

2.3.1 Montage pour les essais de la technique de la spectrométrie par impédance

La première évaluation concerne la technique de la spectrométrie par impédance. Les expérimentations ont été effectuées à l'aide de plants de tomates disponibles chez les détaillants. Ces derniers étaient démarrés pour la culture en terre. Par conséquent, il est plus difficile de forcer une situation de déficit nutritionnel qu'en culture hydroponique. La mesure d'impédance consistait à insérer 2 aiguilles en acier nickelé à 10 cm de distance dans la tige du plant de tomates relié à un système d'acquisition. Ce dernier était composé d'un module *Analog Discovery* de *Digilent* et d'une résistance. Le module permettait de générer les signaux d'excitation et d'en faire l'acquisition. La figure 32 présente le schéma de branchement.

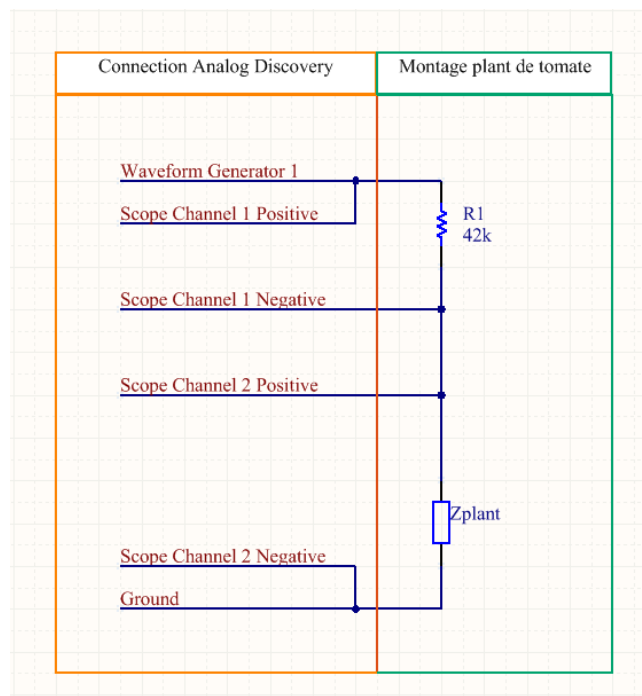


Figure 32 Schémas de mesure de l'impédance électrique

Le module *Analog Discovery* permettait d'effectuer un balayage en fréquence à l'aide du générateur de fonction intégré et les valeurs de tension ont été enregistrées afin de mesurer l'impédance à une fréquence donnée. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 33. Considérant que le substrat est un mélange de divers terreaux et de matière organique, il est normal de ne pas distinguer de différence significative entre les deux groupes sur la période étudiée.

L'apparition de nécrose après la première journée autour du point d'insertion de l'aiguille dans la tige suggérait qu'il avait modification de la dynamique de la plante. Cela engendrait une diminution de la résistance biotique du plant puisque la paroi végétale est endommagée. L'implantation du dispositif pour la durée de vie du plant et son retrait à la fin nécessiterait une désinfection rigoureuse avant de le réimplanter afin de minimiser les risques de propagation d'infection. Afin d'avoir un portrait fidèle de l'ensemble de la production, cela nécessiterait un nombre considérable de dispositifs. Pour ces raisons, l'exploration de cette technique a été rapidement abandonnée. Une technique moins invasive est préférée dont celle utilisant des caméras qui ne nécessitent pas de contact avec les plants. Par conséquent, les risques de propagations de maladies et d'endommager le plant sont minimisés et ne modifient pas la dynamique du plant. De plus, une fois le dispositif installé dans la serre, il nécessite moins de mains-d'œuvre par la suite. Ce dernier permet facilement de prendre une mesure de plusieurs plants. Un faible nombre de ces appareils pourrait facilement couvrir l'ensemble de la production lorsqu'embarqué sur des rails motorisés installés au-dessus des plants.

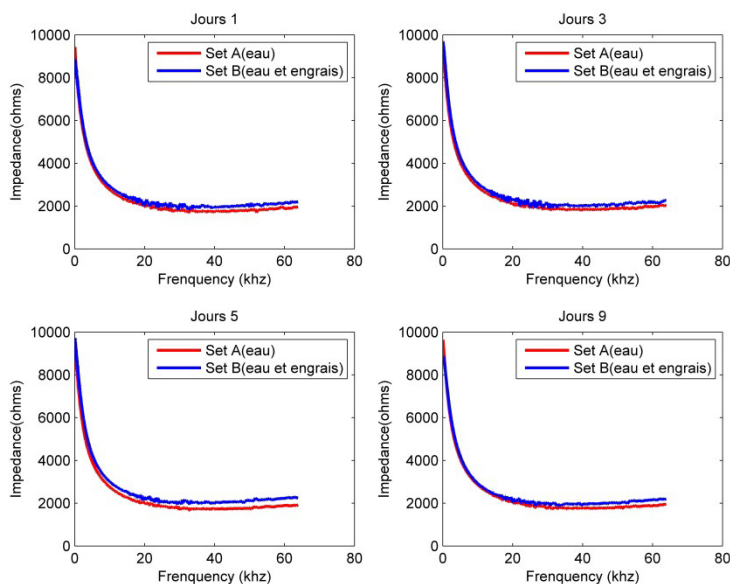


Figure 33 Résultats des mesures d'impédance électrique

2.3.2 Montage pour les essais de la technique de la fluorescence

Les expérimentations de la fluorescence ont été effectuées au Pavillon de recherche forestière de l'UQAC dans une chambre de croissance CONVIRON CMP6050. La taille de cette dernière est approximativement de 82 cm de profondeur, 185 cm de large et de 121 cm de haut. Cet espace a permis d'installer deux montages hydroponiques pour le premier groupe d'essai et trois montages pour le second groupe d'essai. La figure 34 présente l'un des montages hydroponiques utilisés et la figure 35 montre l'installation de notre système dans la chambre de croissance.

Le réservoir de chaque montage avait une capacité de 30L de solution nutritive. Le niveau d'eau était maintenu constant à l'aide d'un interrupteur à flotteur placé dans le réservoir et d'une pompe extérieure connectée à un réservoir d'eau potable. La teneur de la solution nutritive était ajustée périodiquement en fonction de sa concentration.

Les montages pour faire l'acquisition du phénomène de fluorescence de la chlorophylle étaient composés d'un ordinateur monocarte Raspberry Pi A+, d'une caméra Raspberry Cam NoIR et d'un système d'éclairage à base de DEL. Les DEL avaient une longueur d'onde centrée à 470 nm et une puissance nominale de 8.08 lumens dans la première version utilisée pour le premier groupe d'essai et pour la seconde version de 30.6 lumens pour l'acquisition du second groupe d'essai. La mesure consistait à prendre une vidéo de 100 secondes. L'éclairage était activé deux secondes après le début de l'acquisition. Les mesures étaient enregistrées localement. Par la suite, les données ont été transférées sur un ordinateur de bureau afin d'être traitées. La figure 36 présente les premières versions du dispositif et la figure 37, la seconde version.



Figure 34 Montage expérimental



Figure 35 Installation du montage expérimental dans la chambre de croissance

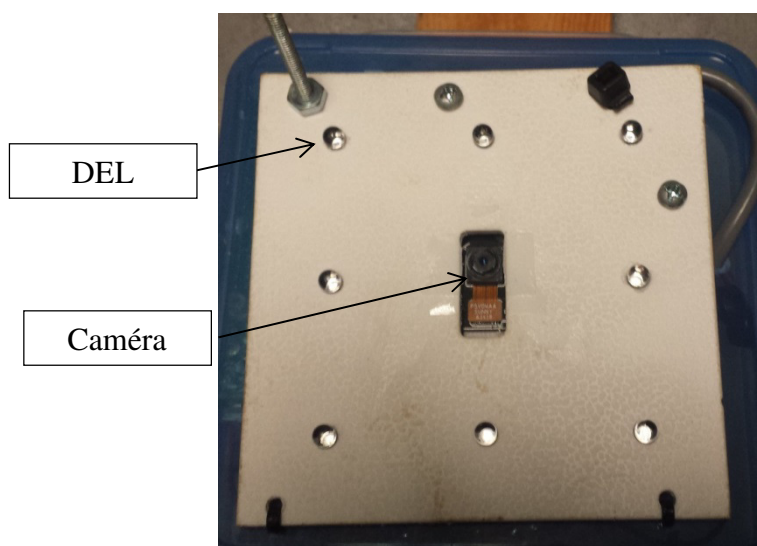


Figure 36 : Dispositif d'acquisition (première version)

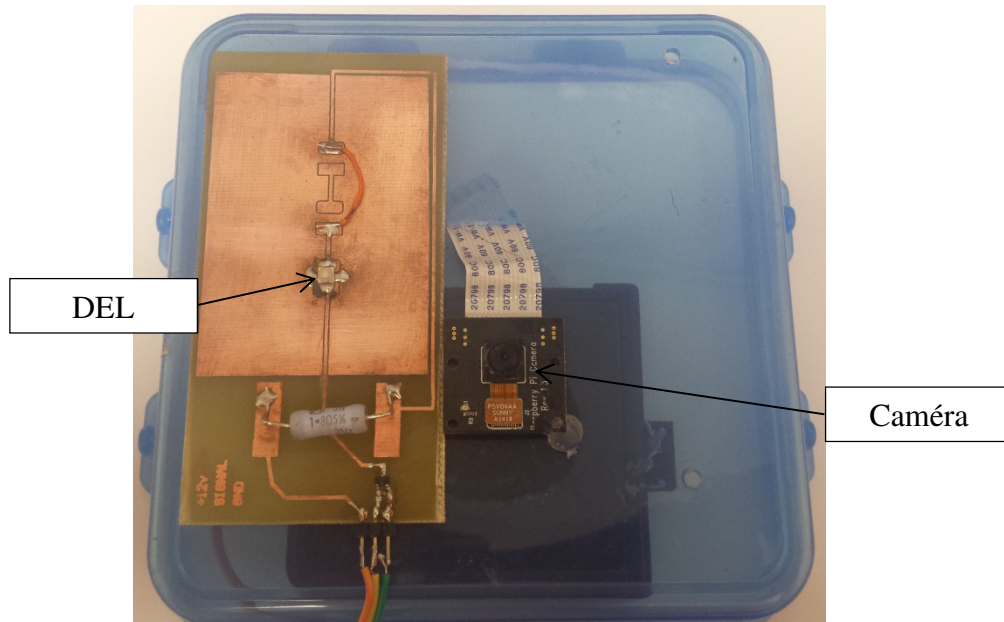


Figure 37 : Dispositif d'acquisition (seconde version)

2.3.3 Calibration des caméras

La prise de mesure du premier groupe s'est effectuée manuellement avec un seul système d'acquisition. Cependant, pour le second groupe, la prise de mesure fût automatisée et chacun des montages avait son système d'acquisition (pi1, pi2 et pi3). Il a été nécessaire de valider que les caméras de ces derniers avaient la même réponse suite à une même stimulation. Pour ce faire, un montage a été effectué afin de générer une lumière reproductible pour chacun des systèmes d'acquisition. Sachant que la mesure de la fluorescence est dans le proche infrarouge, le montage de calibration a été conçu avec une DEL rouge émettant à 585 nm et dont l'intensité était variée par une modulation par largeur d'impulsion à 550 Hz. La mesure a été effectuée dans une chambre noire. La figure 38 présente les résultats avant la calibration.

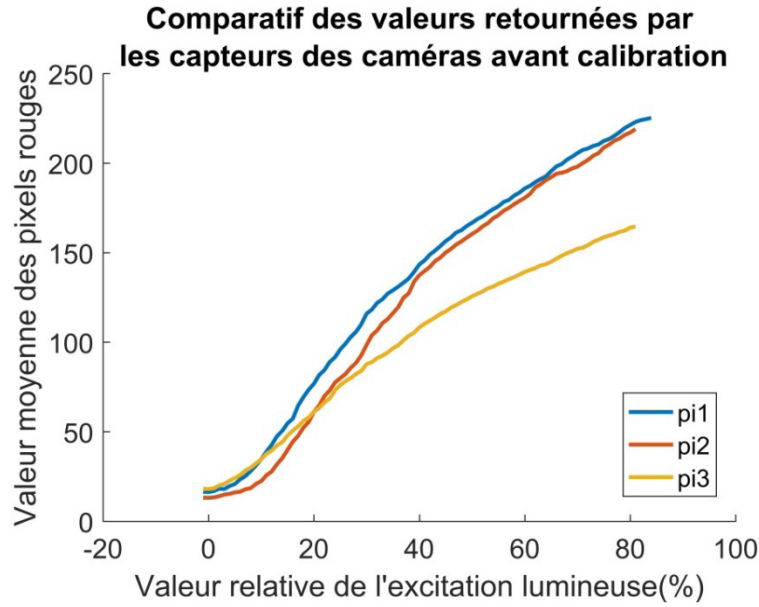


Figure 38 Comparatif des valeurs retournées par les capteurs des caméras avant calibration

Dans le cadre de ce projet, il a été tenté d'observer une différence de mesure entre les divers groupes de l'essai. Par conséquent, une calibration différentielle a été effectuée. La calibration a été complétée de manière à obtenir des mesures semblables à la mesure obtenue par le système d'acquisition de référence (pi1). Une correction linéaire a été effectuée afin d'obtenir des résultats similaires entre les 3 systèmes d'acquisition. Les équations permettant cette correction sont les suivantes :

$$V_{pi2 \text{ corrigé}} = 0.98 V_{pi2 \text{ mesuré}} + 13.42 \quad (25)$$

$$V_{pi3 \text{ corrigé}} = 1.424 V_{pi3 \text{ mesuré}} - 11.58 \quad (26)$$

Les paramètres de ces équations ont été calculés afin de minimiser l'erreur moyenne entre ces deux systèmes et le système de référence. Une fois les paramètres calculés, cette correction s'effectue lors du prétraitement des résultats. Les courbes obtenues suite à

cette calibration sont présentées à la figure 39. La valeur moyenne des pixels rouges non égale à zéro est généralement située entre 60 et 100 pour le phénomène observé. Les valeurs en inférieure à 60 sont obtenues lorsqu'il n'y a pas d'éclairage. Par conséquent, elles ne sont pas utilisées dans l'interprétation des données. Dans le cas où les valeurs de fluorescence dépasseraient 100, la puissance de l'excitation lumineuse serait diminuée afin que la valeur de la fluorescence reste dans la zone linéaire.

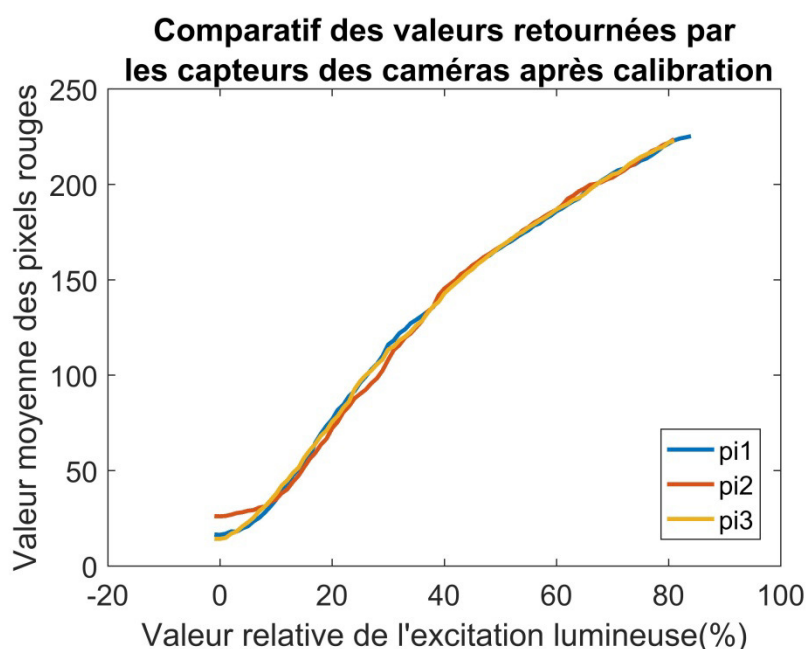


Figure 39 Comparatif des valeurs retournées par les capteurs des caméras après calibration

2.4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, la modélisation des éléments essentiels à l'étude de l'absorption d'eau et de nutriments a été effectuée afin de comprendre les paramètres importants dans un système de suivi et de diagnostic de la plante. Par la suite, la modélisation d'un système hydroponique à système fluidique fermé avec et sans compensateur a démontré la nécessité d'avoir un régulateur de niveau d'eau et de

concentration en nutriments. Le choix du type de régulateur se base sur la caractéristique nécessaire du système à réguler, soit d'éviter les dépassements de consigne. Le point d'opération pour la consigne en concentration de nutriments est très près de la valeur maximale de concentration sans qu'il ait modification irréversible de la dynamique d'absorption d'eau et de nutriments. Cependant, puisque l'absorption de nutriments et d'eau s'effectue au niveau racinaire, les caractéristiques de la solution sont différentes de celle contenue dans le réservoir de solution recirculé. Pour des systèmes de grande dimension, il est difficile d'évaluer le gradient de concentration pour l'ensemble du système.

Afin d'évaluer ce gradient, le premier montage utilisait la mesure de l'impédance électrique. Cependant, ce montage était invasif puisqu'il mesure le niveau de santé des plants en insérant des sondes dans la tige du plant et en y faisant circuler un courant électrique. Cette méthode a été rapidement abandonnée puisqu'il y a eu apparition de nécrose après la première journée autour du point d'insertion du dispositif dans la tige. Cela suggérait qu'il avait modification de la dynamique de la plante et pouvait entraîner des problèmes d'infections diverses. Le second montage était non invasif et utilisait un système de caméra afin de mesurer la fluorescence de la chlorophylle. Cette mesure indirecte mais non-invasive, possède un grand potentiel d'estimer la concentration en nutriments dans le système suite à une calibration adéquate des caméras. L'évaluation des résultats obtenus à l'aide de ce montage est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Évaluation du système de surveillance proposé

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, il a été démontré qu'un système hydroponique en circuit fluide fermé est possible avec une commande classique de type proportionnelle. Cependant, le système de mesure doit être calibré afin de maintenir la solution nutritive à l'intérieur des limites des concentrations. Cette mesure indirecte de la concentration en nutriments à l'aide de la fluorescence de la chlorophylle a été proposée en utilisant une caméra proche infrarouge.

À l'aide du montage proposé pour la mesure de la fluorescence décrite dans le chapitre précédent, le système de vision numérique doit être validé. En effet, ce chapitre propose de valider l'hypothèse que la mesure de la fluorescence de la chlorophylle, à l'aide du dispositif élaboré dans le chapitre 2, reflète adéquatement le statut nutritionnel des plants de tomates en utilisant le montage expérimental proposé.

Dans un premier temps, une présentation du protocole expérimental sera effectuée. Par la suite, des mesures ont été prises et prétraitées afin d'obtenir des résultats initiaux. Ces derniers ont été analysés de manière à trouver des tendances liées à la confirmation de l'hypothèse. Pour finir, une discussion de ces résultats sera effectuée.

3.2 Protocole expérimental

Pour débiter, des essais exploratoires ont été effectués à l'aide de la spectrométrie par impédance électrique et de la fluorescence de la chlorophylle. À la fin de l'été 2014, une exploration des méthodes de spectrométrie a été complétée à l'aide de plants de tomates disponible régionalement, sans l'obtention de résultats pertinents liés à la problématique. Par la suite, à l'été 2015, des essais avec la fluorescence de la chlorophylle ont été réalisés à l'aide de plants de tomates de types Alaska Heirloom démarré à l'UQAC. Ces derniers étaient composé de deux groupes. Le premier avait une solution nutritive adéquate, selon les données du fabricant (General Hydroponics) avec une concentration de 1200 ppm de nutriments, et le second, une solution nutritive déficiente composée d'eau provenant des installations du pavillon de recherche sans aucun ajout de nutriments (<60 ppm). La solution nutritive de chaque groupe était changée chaque semaine. Les plants de tomates utilisés pour ces groupes étaient âgés de deux mois et utilisaient une solution nutritive adéquate avant l'essai. À l'aide de données récoltées, les algorithmes de traitement ont été élaborés. Les résultats obtenus étaient suffisamment intéressants afin de passer à une seconde phase d'essai.

Par la suite, des mesures de fluorescence pour des valeurs de concentration de nutriments intermédiaire ont été effectuées. Pour ce faire, les valeurs de concentration en nutriments retenues étaient de 400 ppm, 800 ppm et de 1600 ppm. La stratégie de contrôle de la concentration des nutriments utilisés était de maintenir cette concentration autour de la valeur cible de 1200 ± 150 ppm. Lorsqu'un écart de concentration devenait plus important, la solution était changée. Le niveau de la solution était maintenu constant par

l'ajout automatisé d'eau déminéralisée. Les mesures de la fluorescence ont été effectuées à l'aide d'une caméra proche infrarouge et d'un système d'éclairage LED dédié. Les vidéos ont subi un prétraitement afin de les conditionner avant l'analyse des résultats. Par la suite, l'analyse de ces résultats a permis d'évaluer la sensibilité du capteur à un changement de concentration de la solution nutritive.

3.3 Traitement des données brutes des caméras

Il a été nécessaire de constituer une chaîne de traitement afin d'obtenir un indice lié à la fluorescence pouvant différencier des concentrations de nutriments. En particulier, car la valeur de l'indice est influencée par la distance entre la caméra et la plante et le champ de vision. La figure 40 présente la chaîne de traitement des données de la fluorescence jusqu'aux résultats pouvant permettre d'extraire un indice. Elle se divise en 3 sections. La première est la caméra qui permet de numériser le phénomène de fluorescence. La seconde partie est l'ordinateur monocarte qui permet d'effectuer la mesure automatisée et de la sauvegarder sous forme de vidéo. La dernière est l'ordinateur de bureau où les calculs de l'indice sont complétés. Ce dernier possède une puissance de calcul largement supérieure à l'ordinateur monocarte et permet le traitement des vidéos afin de conditionner les données qui seront avec l'aide de MatLAB. Le prétraitement se situe dans la dernière section et utilise les fichiers vidéos générés par la seconde partie.

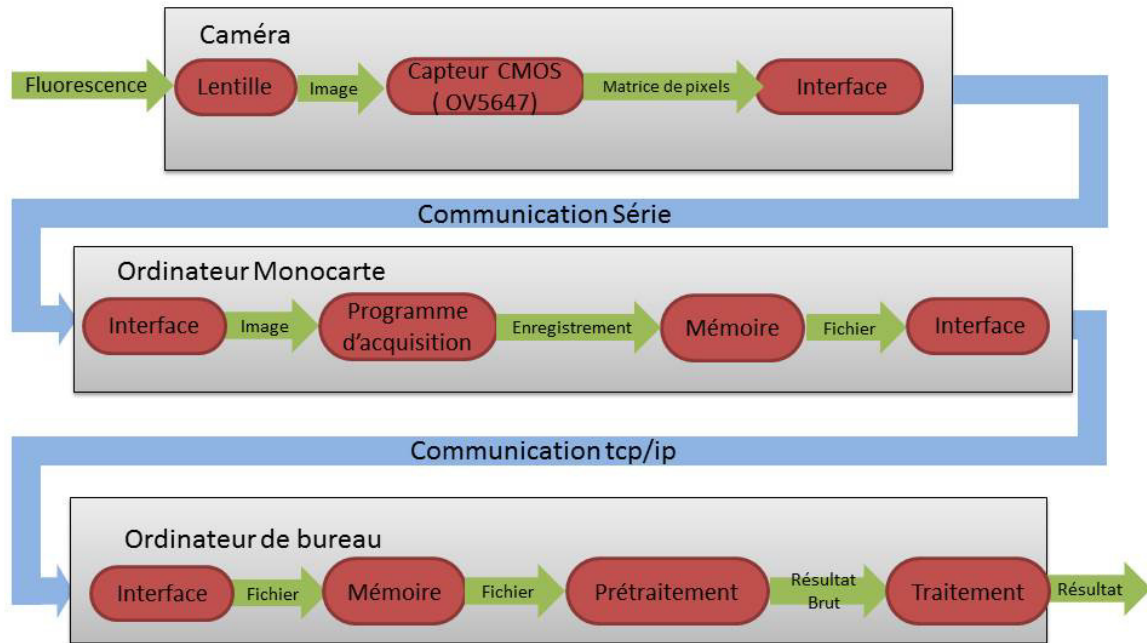


Figure 40 Chaîne de traitement des données de fluorescence

Chaque clip vidéo est constitué d'une succession d'images à deux dimensions avec un taux de rafraîchissement de 1/25 de seconde. Les prétraitements retenus traitent l'image afin d'en obtenir une valeur en fonction du temps. Pour débiter, une moyenne des pixels rouges de l'image différents de zéro a été effectuée. La figure 42 présente deux images ayant la même moyenne. Cette étape permet de minimiser l'effet du champ de vision sur les mesures. Lorsque la distance diminue entre la caméra et l'objet, le champ de vision diminue également (figure 41). Le système d'éclairage a été conçu afin de ne pas émettre de lumière proche de la plage de longueur d'onde du phénomène de fluorescence. Par conséquent, il n'a pas été nécessaire d'utiliser des techniques de soustraction d'arrière-plan afin d'éliminer la lumière réfléchie sur les divers composants de la chambre de croissance.

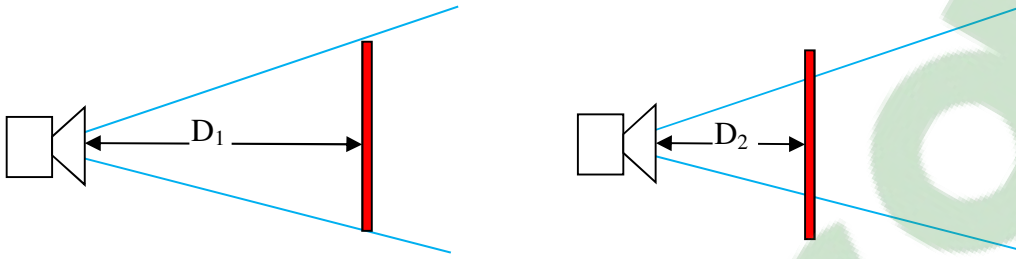


Figure 41 Effet du champ de vision



Figure 42 Exemple d'images ayant la même valeur moyenne des pixels rouges différents zéro

L'expression qui définit cette opération est la suivante :

$$F_m(k) = \frac{\sum_j \sum_i P_{rouge}(i,j)}{N_{pixelRouge}}, \quad (27)$$

où $F_m(k)$ est la valeur moyenne de la fluorescence de la chlorophylle pour l'image k , $P_{rouge}(i,j)$ est la valeur du pixel rouge à la position i,j de l'image et $N_{pixelRouge}$ est le nombre de pixels rouges de l'image différents de zéro.

L'intensité lumineuse reçue est influencée par la distance entre le point d'observation et le point d'émission. La relation entre l'intensité lumineuse et la distance est présentée à l'équation (28) [38] :

$$E = \frac{I_0 \cos(\theta)}{R^2}, \quad (28)$$

où E est l'intensité lumineuse reçue, R est la distance entre la source et le point d'émission, θ est l'angle d'émission et I_0 est la puissance d'émission.

Dans une mesure, il y a de multiples sources d'émission qui se déplacent d'un jour à l'autre et d'un groupe à l'autre, il devient donc difficile de faire une mesure absolue de la fluorescence dans l'objectif de les comparer. L'utilisation d'une valeur relative a permis de comparer ces groupes plus facilement. Le traitement retenu est un filtrage à l'aide d'un filtre de Savitzky-Golay afin d'éliminer le bruit généré par le mouvement des feuilles dû à la ventilation suivie d'une normalisation par rapport à la valeur moyenne maximale mesurée dans le clip vidéo entier. La normalisation est définie par l'équation (29). Cette valeur est liée à la réaction photochimique de la chlorophylle correspondant au point P de la figure 11. Elle atteint généralement sa valeur maximale dans les premières secondes après le début de l'exposition [19, 20]. La figure 43 présente deux images ayant la même valeur moyenne normalisée.

$$F_n(k) = \frac{F_m(k)}{\text{Max}(F_m)}, \quad (29)$$

où $F_n(k)$ est la valeur moyenne normalisée de la chlorophylle pour l'image k , $F_m(k)$ est la valeur moyenne de la fluorescence de la chlorophylle pour l'image k et $Max(F_m)$ est la valeur maximum de fluorescence pour le clip vidéo entier.



Figure 43 Exemple d'images ayant la même valeur moyenne filtrée normalisée

3.4 Résultats

La prise des mesures s'est déroulée sur une durée de deux semaines dans le cas du premier groupe d'essai et de un mois pour le second groupe. Les âges des plants utilisés étaient, respectivement, de 1.5 mois et de deux semaines. Après l'acquisition du clip vidéo, le prétraitement a été effectué. Ce dernier consistait à calculer la valeur d'un indice lié à la fluorescence moyenne de chaque image contenue dans le clip vidéo, à les filtrer afin de diminuer l'influence du bruit et à normaliser les mesures afin d'obtenir des valeurs relatives pouvant représenter la fluorescence. La principale source de bruit était le changement d'orientation des feuilles soumises au courant d'air créé par la ventilation. Les courbes pour les groupes de 0 ppm et de 1200 ppm de l'été 2015 ont moins de bruit, car le positionnement des montages dans la chambre de croissance était différent et les plants de tomate étaient de plus grande taille lors du début de la prise de mesure. Par conséquent, ces derniers avaient moins d'espace pour bouger. Le filtre utilisé était un filtre de Savitzky-Golay d'ordre 3 avec une fenêtre de 1.25 sec. Il a permis d'atténuer ce bruit. Les figures 44 à 48 présentent les courbes filtrées. Par la suite, ces résultats ont été analysés et soumis à des test statistiques afin de tirer des conclusions sur cet essai.

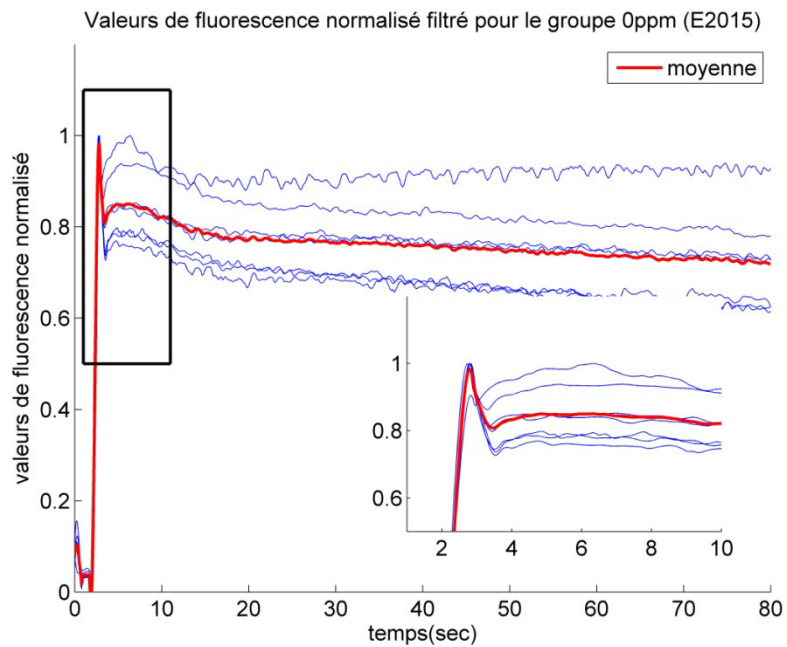


Figure 44 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 0 ppm de nutriments (premier groupe d'essai)

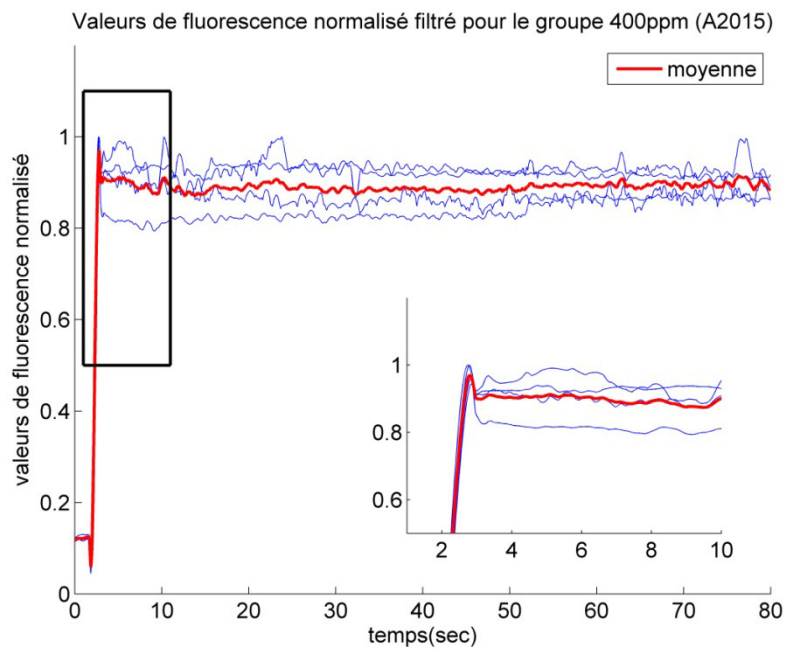


Figure 45 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 400 ppm de nutriments (second groupe d'essai)

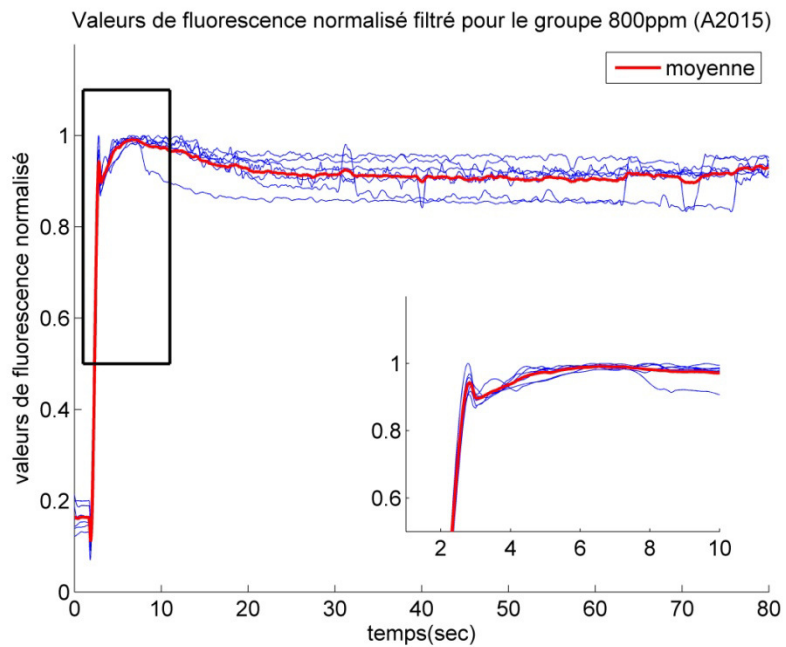


Figure 46 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 800 ppm de nutriments (second groupe d'essai)

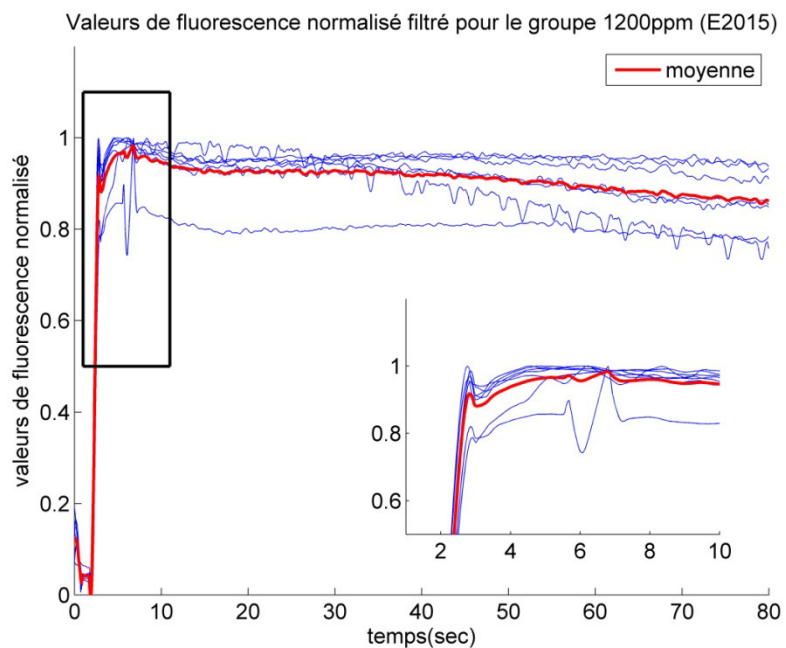


Figure 47 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 1200 ppm de nutriments (premier groupe d'essai)

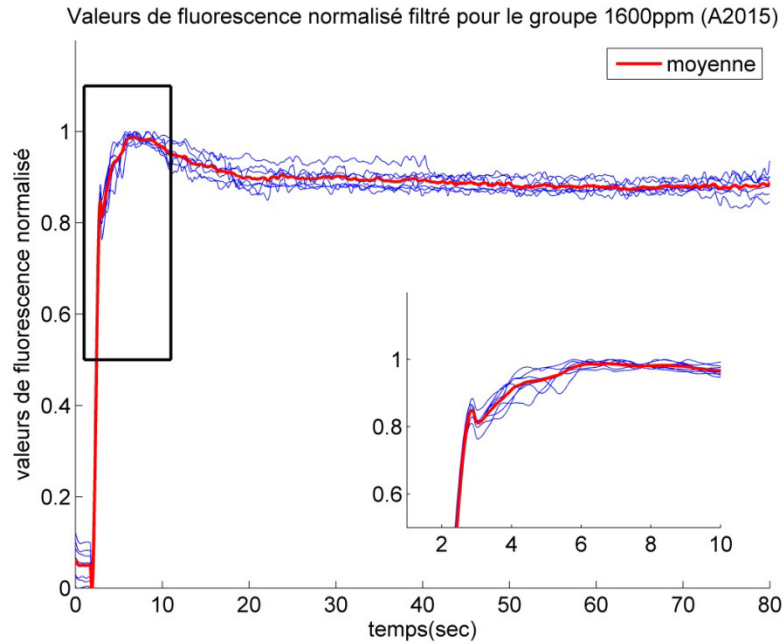


Figure 48 Valeurs de l'indice de la fluorescence normalisées et filtrées pour le groupe ayant une solution de 1600 ppm de nutriments (second groupe d'essai)

3.5 Analyse des résultats

L'analyse des résultats est séparée en deux sous-sections. La première porte sur l'analyse de l'indice de la fluorescence. Les résultats obtenus sont analysés afin de sélectionner des indicateurs qui peuvent différencier les diverses situations nutritionnelles. La seconde section traite de la classification des statuts nutritionnels à l'aide des indicateurs sélectionnés dans la première section. L'objectif de la classification est d'obtenir un indice du statut nutritionnel pouvant favoriser une commande pour l'asservissement, en circuit fluide fermé, de la concentration des nutriments.

3.5.1 Analyse de la fluorescence

L'analyse des résultats des deux périodes d'essais a été effectuée séparément. Pour débiter, les courbes moyennes ont été compilées dans une même figure afin de faciliter la

comparaison. Ainsi, la figure 49 présente ces courbes pour l'été 2015 et la figure 50, pour l'automne 2015. L'allure de ces courbes se rapproche de la courbe théorique présentée à la figure 11 par Nishina [20]. Cependant, certains phénomènes n'apparaissent pas ou leurs amplitudes ne permettent pas de les différencier clairement du reste du signal. Ces points caractéristiques peuvent avoir été cachés par la présence de bruit ou avoir été affectés par l'utilisation du filtre. Il est possible d'observer une modification de l'allure générale des courbes en fonction de la concentration en nutriments. Le changement d'amplitude du pic se situant entre 2 et 4 secondes est l'un des éléments le plus évident à observer et correspond au point P de la figure 11. Par la suite, l'amplitude maximale entre 4 et 8 secondes correspond au point M et tend à varier en fonction de la valeur de la concentration en nutriments. Pour finir, le point S est la valeur du creux entre les points P et M.

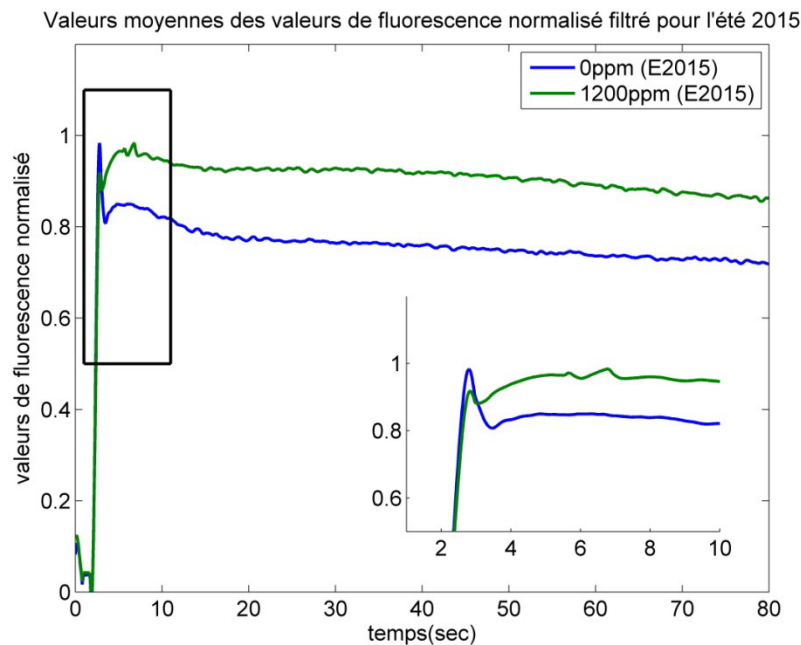


Figure 49 Comparatif des courbes moyennes pour l'été 2015

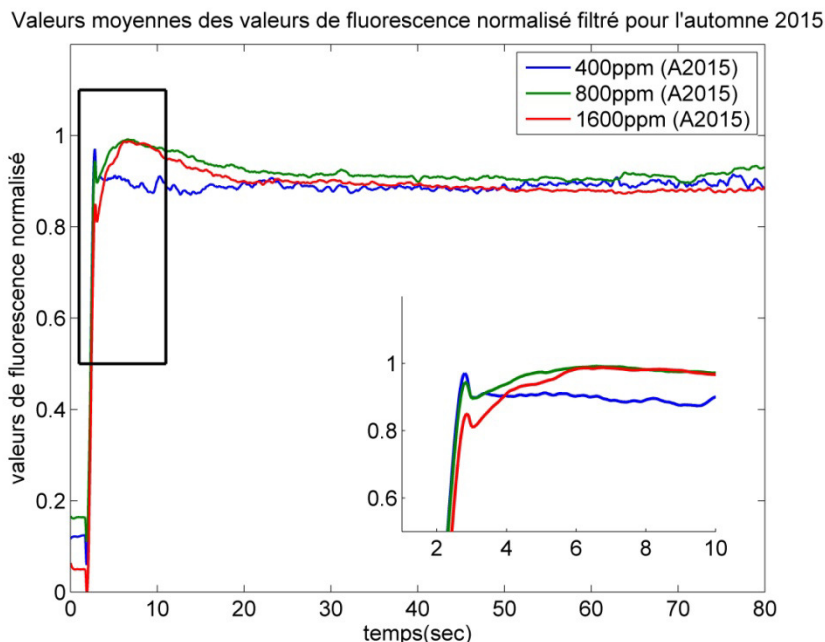


Figure 50 Comparatif des courbes moyennes pour l'automne 2015

À l'aide de ces points, des analyses statistiques ont été effectuées afin d'étudier la différenciation entre chaque concentration. Les premières analyses consistaient à utiliser les valeurs individuelles des points P, S et M. Les figures 51 à 56 présentent les valeurs de ces points pour chacun des groupes. Considérant que ce sont des valeurs relatives qui ont été normalisées en fonction de la valeur maximale de fluorescence, il est normal que les points P et M soient égaux à 1 puisque ce sont les points qui ont été utilisés pour effectuer cette opération. Les tableaux 11 à 16 indiquent la probabilité que l'hypothèse nulle soit rejetée (test de Student), c'est-à-dire que les groupes ne sont pas significativement différents. La valeur seuil α choisie est de 0.05. Les cases en rouge indiquent que les groupes ne sont pas significativement différents et les cases en vert, qu'ils le sont.

Puisque Nishina [20] a obtenu ses résultats en utilisant des ratios de ces points, l'analyse des ratios P/S, M/S et P/M a été effectuée pour les données récoltées. Les figures 57 à 62 présentent les diagrammes en boîte des valeurs pour chacun des groupes et les tableaux 17 à 22 présentent les probabilités statistiques résultant du test de Student pour ces ratios. Les indicateurs ne permettent pas de différencier statistiquement les différents groupes de A2015. Cependant, les résultats obtenus pour les ratios M/S et P/M indiquent que les groupes de l'E2015 et de A2015 sont significativement différents.

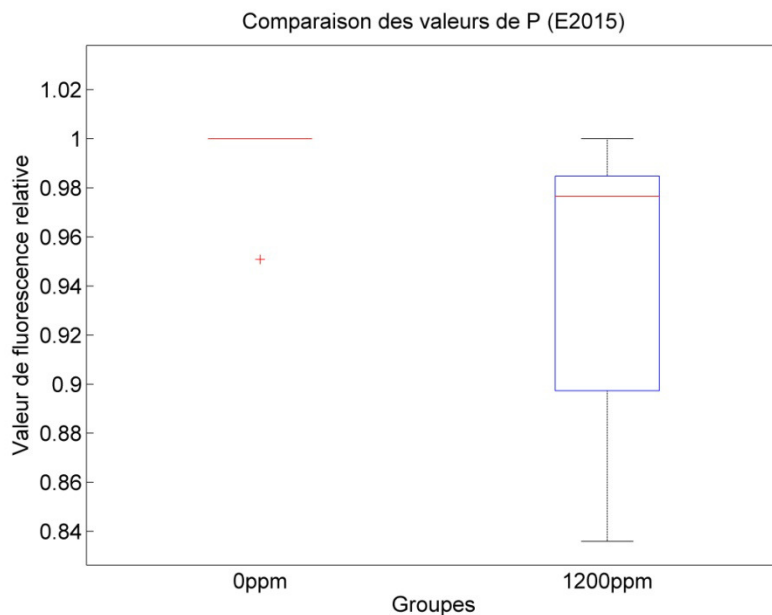


Figure 51 Valeurs du point P pour l'essai E2015

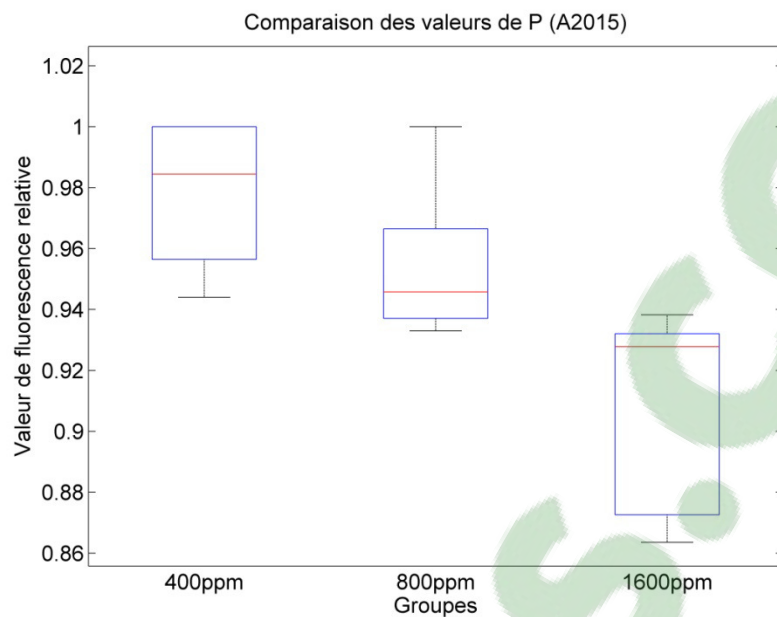


Figure 52 Valeurs du point P pour l'essai A2015

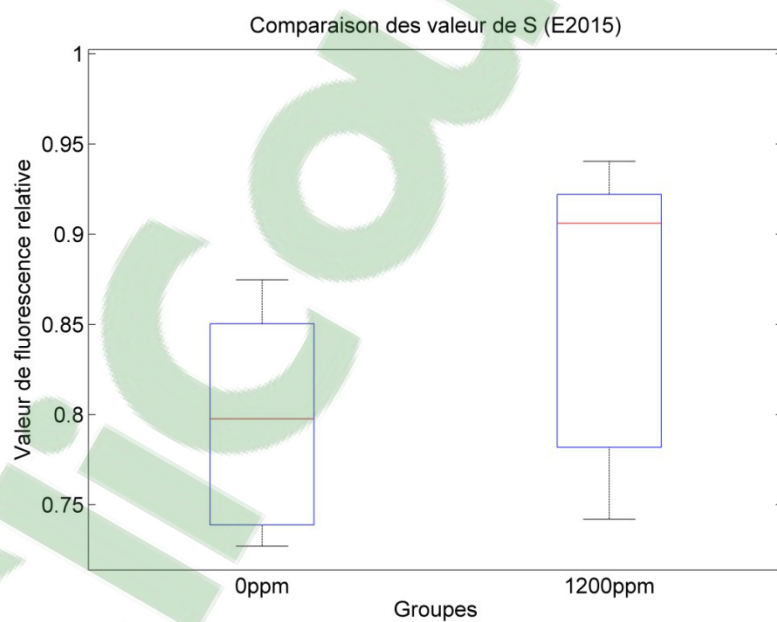


Figure 53 Valeurs du point S pour l'essai E2015

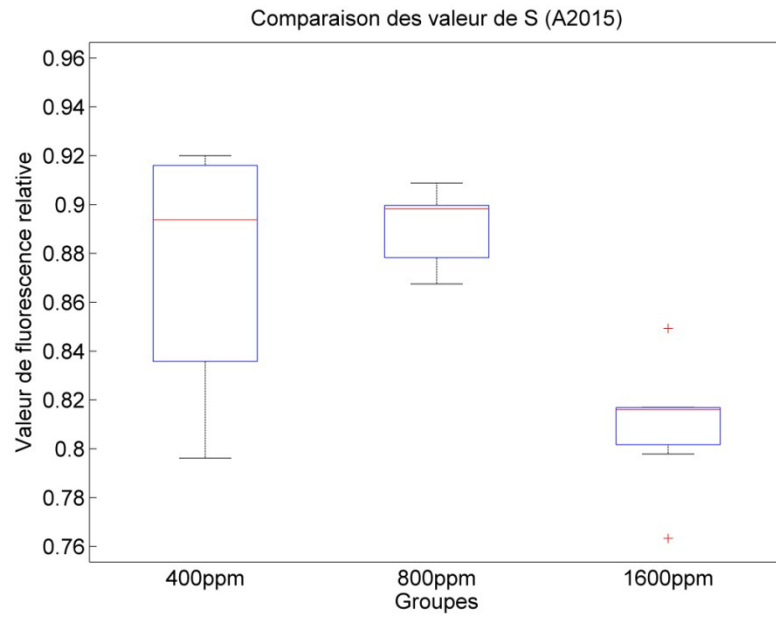


Figure 54 Valeurs du point S pour l'essai A2015

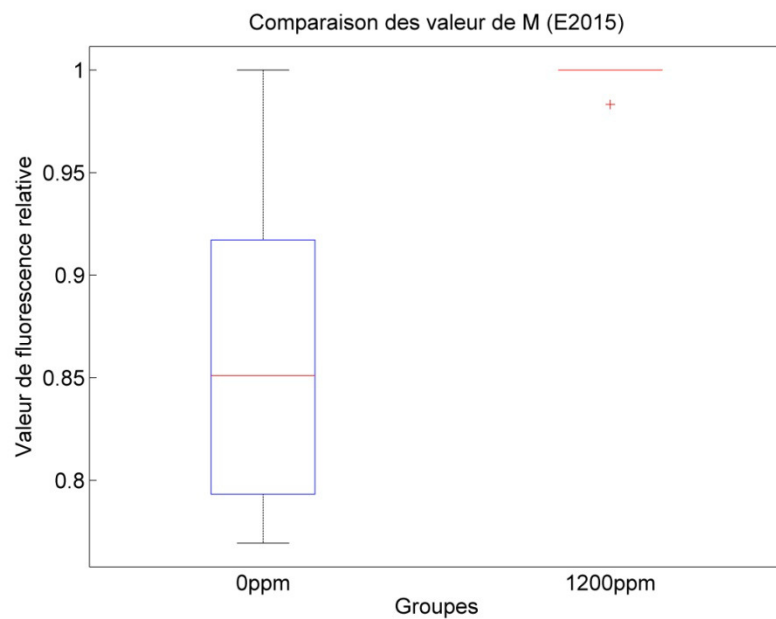


Figure 55 Valeurs du point M pour l'essai E2015

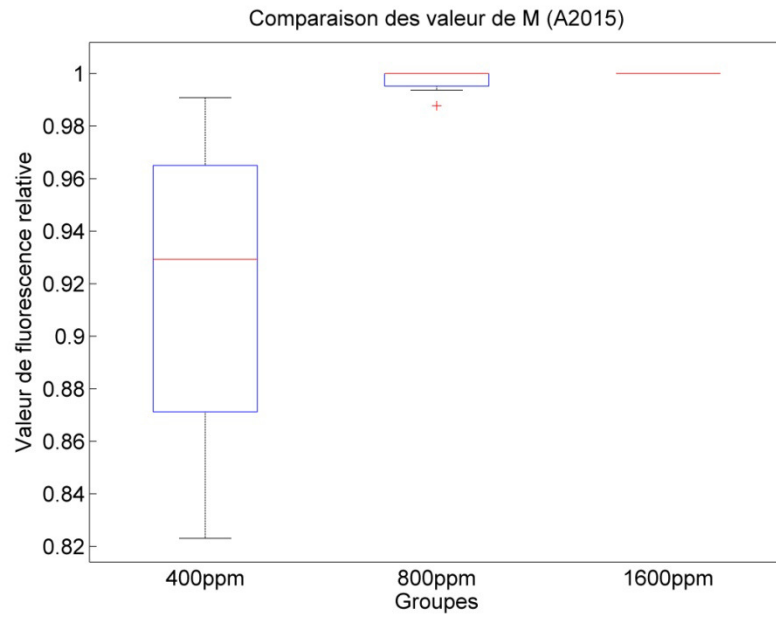


Figure 56 Valeurs du point M pour l'essai A2015

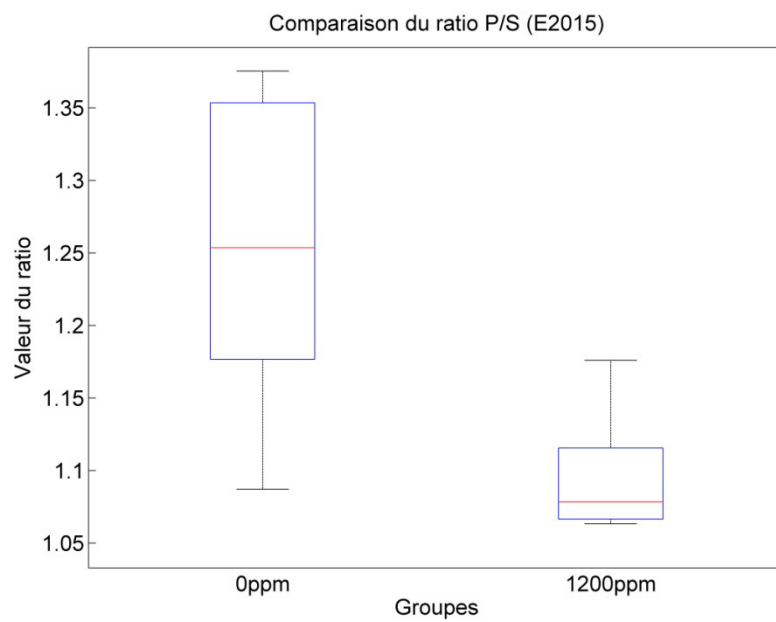


Figure 57 Valeurs des ratios P/S pour E2015

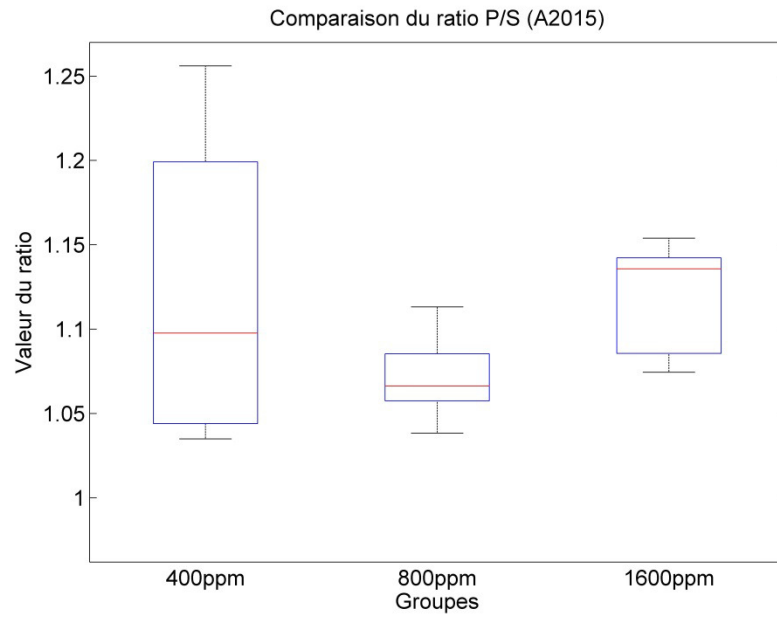


Figure 58 Valeurs des ratios P/S pour A2015

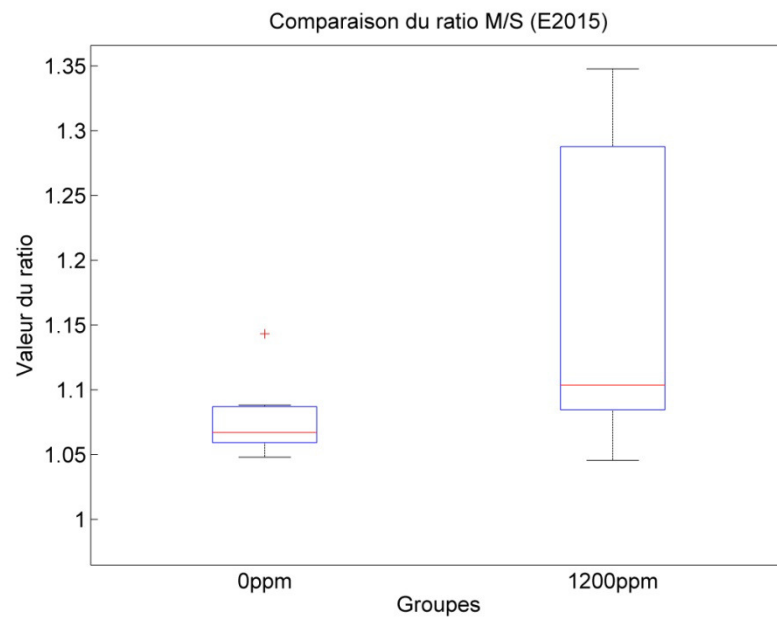


Figure 59 Valeurs des ratios M/S pour E2015

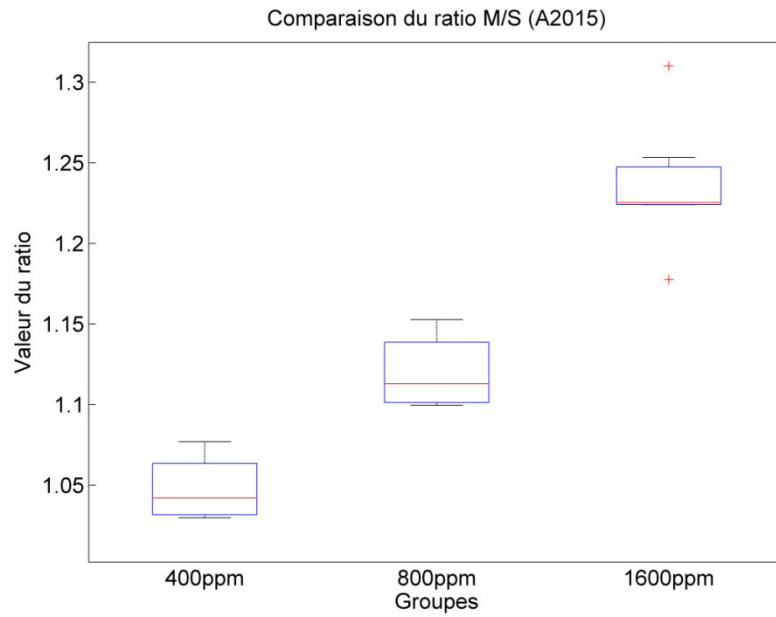


Figure 60 Valeurs des ratios M/S pour A2015

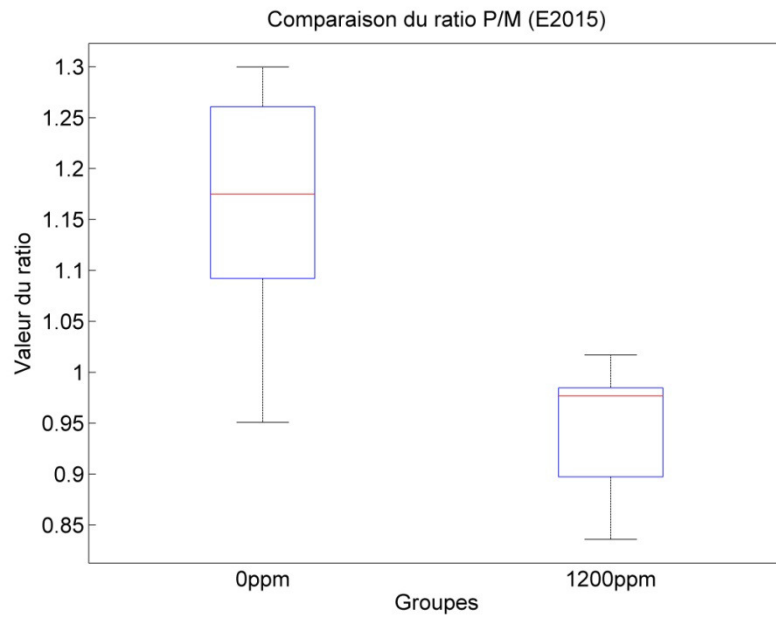


Figure 61 Valeurs des ratios P/M pour E2015

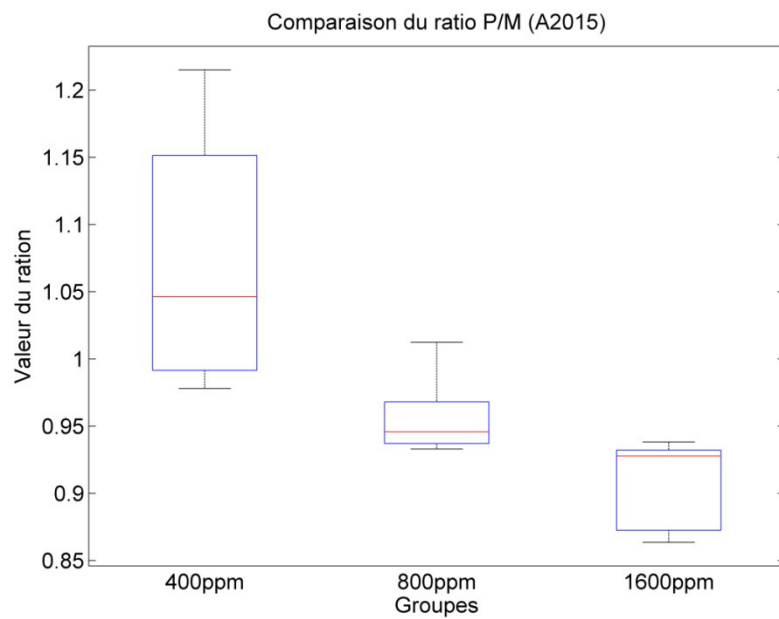


Figure 62 Valeurs des ratios P/M pour A2015

Tableau 11 Tableau de l'analyse statistique pour la valeur du point P de l'essai de E2015

	Groupe de 0ppm	Groupe de 1200ppm
Groupe de 0ppm		0.09
Groupe de 1200ppm	0.09	

Tableau 12 Tableau de l'analyse statistique pour la valeur du point P de l'essai de A2015

	Groupe de 400ppm	Groupe de 800ppm	Groupe de 1600ppm
Groupe de 400ppm		0.1657	0.0051
Groupe de 800ppm	0.5592		0.0084
Groupe de 1600ppm	0.0051	0.0084	

Tableau 13 Tableau de l'analyse statistique pour la valeur du point M de l'essai de E2015

	Groupe de 0ppm	Groupe de 1200ppm
Groupe de 0ppm		0,00087773
Groupe de 1200ppm	0,00087773	

Tableau 14 Tableau de l'analyse statistique pour la valeur du point M de l'essai de A2015

	Groupe de 400ppm	Groupe de 800ppm	Groupe de 1600ppm
Groupe de 400ppm		0.0126	0.0104
Groupe de 800ppm	0.0126		0.1726
Groupe de 1600ppm	0.0104	0.1726	

Tableau 15 Tableau de l'analyse statistique pour la valeur du point M de l'essai de E2015

	Groupe de 0ppm	Groupe de 1200ppm
Groupe de 0ppm		0, 0917
Groupe de 1200ppm	0, 0917	

Tableau 16 Tableau de l'analyse statistique pour la valeur du point M de l'essai de A2015

	Groupe de 400ppm	Groupe de 800ppm	Groupe de 1600ppm
Groupe de 400ppm		0. 5055	0. 0251
Groupe de 800ppm	0. 5055		0.000011814
Groupe de 1600ppm	0. 0251	0. 000011814	

Tableau 17 Tableau de l'analyse statistique pour le ratio P/S pour E2015

	Groupe de 0ppm	Groupe de 1200ppm
Groupe de 0ppm		0. 0030
Groupe de 1200ppm	0. 0030	

Tableau 18 Tableau de l'analyse statistique pour le ratio P/S pour E2015

	Groupe de 400ppm	Groupe de 800ppm	Groupe de 1600ppm
Groupe de 400ppm		0. 2259	0. 9295
Groupe de 800ppm	0. 2259		0. 0105
Groupe de 1600ppm	0. 9295	0. 0105	

Tableau 19 Tableau de l'analyse statistique pour les ratios M/S pour E2015

	Groupe de 0ppm	Groupe de 1200ppm
Groupe de 0ppm		0. 1210
Groupe de 1200ppm	0. 1210	

Tableau 20 Tableau de l'analyse statistique pour les ratios M/S pour E2015

	Groupe de 400ppm	Groupe de 800ppm	Groupe de 1600ppm
Groupe de 400ppm		0. 0004602	0. 00001312
Groupe de 800ppm	0. 0004602		0. 00002151
Groupe de 1600ppm	0. 00001312	0. 00002151	

Tableau 21 Tableau de l'analyse statistique pour les ratios P/M pour E2015

	Groupe de 0ppm	Groupe de 1200ppm
Groupe de 0ppm		0.0014
Groupe de 1200ppm	0.0014	

Tableau 22 Tableau de l'analyse statistique pour les ratios P/M pour E2015

	Groupe de 400ppm	Groupe de 800ppm	Groupe de 1600ppm
Groupe de 400ppm		0. 0215	0. 0035
Groupe de 800ppm	0. 0215		0. 0035
Groupe de 1600ppm	0. 0035	0. 0035	

3.5.2 Classification

La classification des situations de sous-nutrition, surnutrition et adéquate a été effectuée à l'aide de la logique floue. Cet algorithme a été retenu puisqu'il permet une transition graduelle entre les diverses situations nutritionnelles, il est facile à mettre en œuvre et il ne nécessite pas d'avoir un modèle lié au phénomène de la fluorescence [39]. La figure 63 présente le schéma du système d'évaluation nutritionnel. Les fonctions d'appartenance en entrée utilisées sont des fonctions gaussiennes. Les équations de ces dernières sont basées sur la moyenne et l'écart type de chacun des indices en entrée. Les données provenant de E2015 et A2015 ont été fusionnées pour l'élaboration de ce système. Les figures 64 à 66 présentent les fonctions d'appartenance pour chaque entrée. Au final, l'indice du statut nutritionnel varie entre 0 et 2. Ainsi, le cas idéal est représenté par la valeur 1. La valeur inférieure à 1 indique une sous-nutrition et les valeurs supérieures, une surnutrition. Plus l'indice s'éloigne de la valeur idéale, plus l'écart de concentration est important. Les fonctions d'appartenance de cet indice sont présentées à la figure 67.

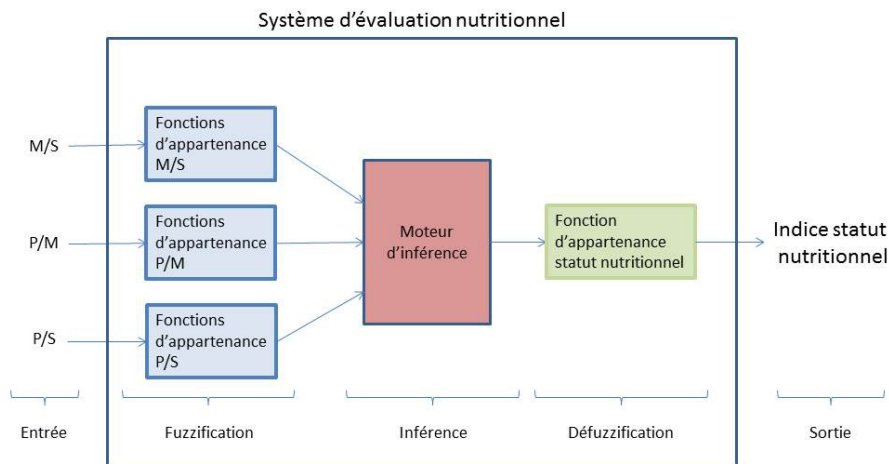


Figure 63 Schéma du système d'évaluation nutritionnel

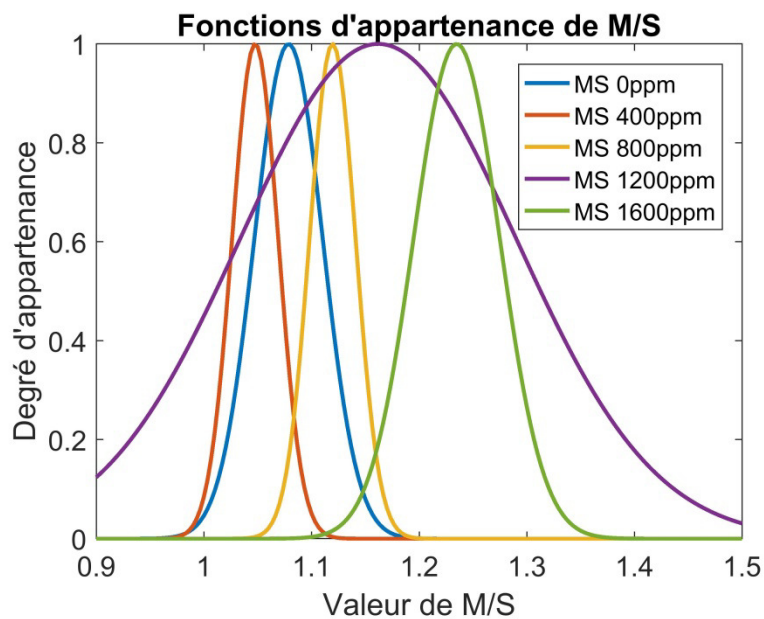


Figure 64 Fonctions d'appartenance de M/S

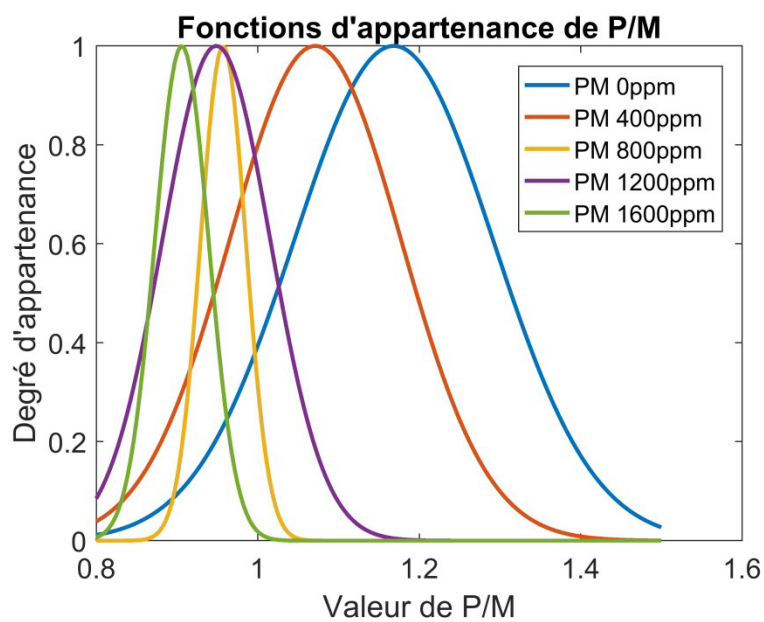


Figure 65 Fonctions d'appartenance de P/M

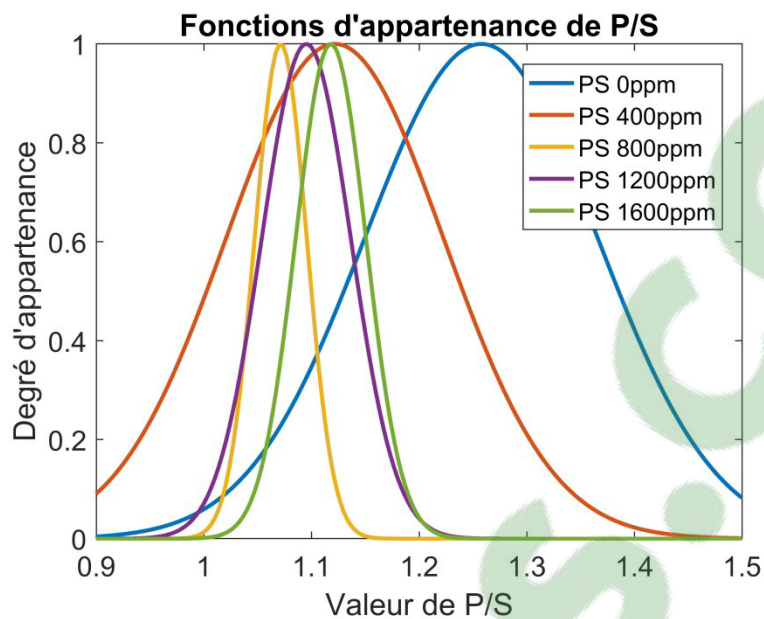


Figure 66 Fonctions d'appartenance de P/S

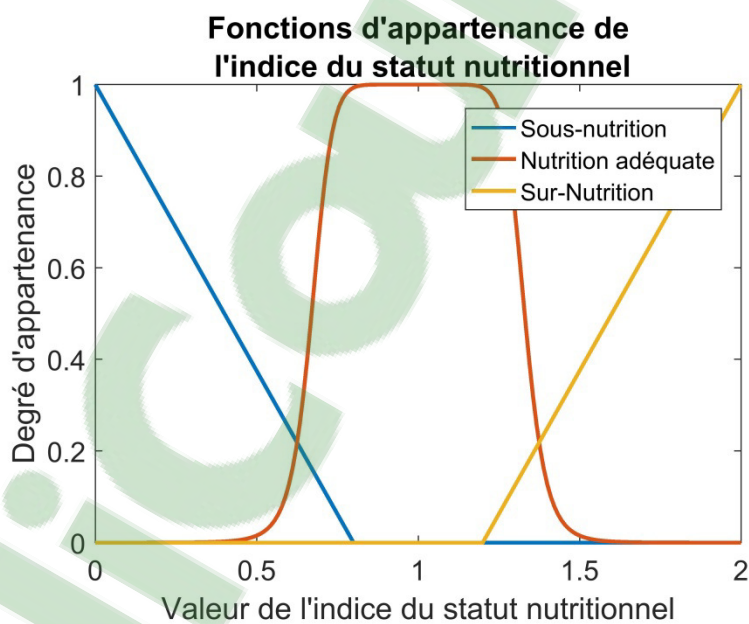


Figure 67 Fonctions d'appartenance de l'indice nutritionnel

Le moteur d'inférence utilisé est de type Mamdani. Ce dernier permet d'utiliser des fonctions d'entrée non-constante [40]. Les règles utilisées par ce dernier sont présentées dans le tableau 23.

Tableau 23 Règles du moteur d'inférence utilisé par le système d'évaluation du statut nutritionnel

	Énoncé de la règle
Règle 1	SI ((MS 0ppm) ET (PM 0ppm) ET (PS 0pmm)) ALORS (Sous-nutrition)
Règle 2	SI ((MS 400ppm) ET (PM 400ppm) ET (PS 400pmm)) ALORS (Sous-nutrition)
Règle 3	SI ((MS 800ppm) ET (PM 800ppm) ET (PS 800pmm)) ALORS (Sous-nutrition)
Règle 4	SI ((MS 1200ppm) ET (PM 1200ppm) ET (PS 1200pmm)) ALORS (Nutrition adéquate)
Règle 5	SI ((MS 1600ppm) ET (PM 1600ppm) ET (PS 1600pmm)) ALORS (Sur-nutrition)

Afin de valider le système d'évaluation du statut nutritionnel, ce dernier a été testé en utilisant les valeurs moyennes utilisées pour la conception du système. Le tableau 24 présente les résultats de cette validation. Il est possible de constater que les fonctions d'appartenance et le système de règles ont été correctement mis en oeuvre et que les résultats obtenus permettent de voir une gradation de l'indice du statut nutritionnel. Par la suite, les données obtenues lors des essais de E2015 et de A2015 ont été soumises au système d'évaluation du statut nutritionnel. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 25. Les valeurs de l'indice du statut nutritionnel pour tous les groupes excepté celui de 1200 ppm respecte le devis initial, soit un indice inférieur à 1 pour les groupes de 0 ppm, 400 ppm et 800 ppm et supérieur à 1 pour le groupe de 1600 ppm. Les valeurs obtenues pour le groupe de 1200 ppm se rapprochent du groupe de 800 ppm. L'observation des fonctions d'appartenances démontre que les courbes pour le groupe de 1200 ppm ont un écart type élevé comparativement aux autres groupes et il serait

pertinent de reprendre une série de mesure sur ce groupe. Par exemple, dans le cas des fonctions d'appartenance de M/S, la courbe de 1200 ppm englobe toutes les autres courbes. Les mesures prises durant la période A 2015 étaient automatisées ainsi que système de maintien du niveau de solution comparativement à la période E 2015 qui ne l'était pas. Par conséquent, ces facteurs semblent avoir eu un impact significatif sur les résultats obtenus.

Tableau 24 Résultats de la validation du système d'évaluation du statut nutritionnel

Groupe	0ppm	400 ppm	800ppm	1200ppm	1600
Indice du statut nutritionnel	0.2611	0.4590	0.7077	1.0254	1.3061

Tableau 25 Résultats de l'essai du système d'évaluation du statut nutritionnel

Groupe	0ppm	400 ppm	800ppm	1200ppm	1600
Indice du statut nutritionnel	0.8135	0.3224	0.7605	1.0491	1.3053
	0.5201	0.4001	0.9156	0.7284	1.1599
	0.2968	0.7572	0.7051	0.7487	1.2566
	0.2631	0.5869	0.7214	1.0362	1.1468
	0.2980		0.6791	0.7206	1.3697
	0.2846		0.8038	0.8165	1.3543
	0.2757		0.7021	0.6526	1.3370

3.6 Discussions

Certaines courbes représentant la fluorescence de la chlorophylle des divers groupes de l'essai semblent se superposer. Par conséquent, lors des analyses statistiques, ces groupes ne sont pas statistiquement différents. Il y a plusieurs sources d'erreur possibles sur le montage expérimental pour expliquer ce problème. Premièrement, la stratégie de contrôle

de la concentration en nutriments consistait à maintenir une concentration donnée avec une tolérance de plus ou moins 150 ppm. Or, les divers groupes n'absorbaient pas ces nutriments à la même vitesse. Par conséquent, l'écart des concentrations entre les divers groupes n'était pas constant. Il aurait été intéressant d'ajouter un module de mesure de la concentration de la solution nutritive pour chaque montage. De cette manière, il aurait été possible d'avoir la concentration exacte au moment de la mesure de la fluorescence. Par exemple, au changement de solution pour le groupe de 400ppm, il était possible d'avoir 250 ppm avant le changement de solution et 500 ppm après. Par conséquent, il est possible que la mesure de fluorescence entre le jour avant et après le changement de solution soit suffisamment différente pour influencer la mesure et donc le calcul de l'indice.

De plus, Davenport, et al. [24] avaient démontré une différence de réflectance des feuilles pour des plants de pommes de terre ayant une différence d'âge de 32 jours. Un tel phénomène pourrait aussi être présent pour la fluorescence de la chlorophylle chez la tomate. Considérant les infrastructures utilisées, il a été impossible d'avoir plusieurs répliques pour chaque groupe pour une même journée. Par conséquent, des essais à plus grande échelle pourraient fournir un plus grand nombre de mesures sur plusieurs plants différents. Cela permettrait de confirmer la tendance observée.

D'un autre côté, les résultats obtenus pour le second groupe d'essais avaient tous plus de bruit que ceux du premier groupe. Le bruit présent dans la première phase d'essais provenait principalement des paramètres de la caméra utilisée. Suite aux visionnements de certains des clips vidéo du second groupe, la source de ce bruit provenait du changement d'orientation des feuilles soumis au courant d'air provenant de la ventilation

en plus du bruit provenant de la caméra. Cela était moins présent dans le premier groupe d'essais, car la taille des plants de tomate était beaucoup plus imposante, car les mesures ont été prises après 40 jours après transplantation. Tandis que, pour le second groupe, les mesures ont été amorcées après 21 jours après transplantation. Dès que la chambre de croissance était activée, il était impossible d'arrêter la ventilation. De plus, il était impossible d'activer la chambre de croissance à distance, car cette dernière ne possédait pas l'interface nécessaire. Dans le cas contraire, il aurait été possible d'arrêter la chambre de croissance lors de la prise de la mesure automatisée. Une seconde source de bruit provient des paramètres de la caméra. Afin de s'assurer de la répétabilité des résultats, ces divers paramètres ont été fixés manuellement. Par conséquent, en désactivant les divers paramètres d'ajustement automatique de la caméra, il y a eu apparition d'un bruit thermique. Ce dernier a été amplifié par une augmentation du gain matériel des pixels rouge. Ce phénomène augmente avec la température du capteur. Le filtrage de ces bruits était effectué après le prétraitement. Par conséquent, les résultats bruts pouvaient être influencés par l'utilisation d'un maximum erroné pour la normalisation de la fluorescence.

3.7 Conclusion

L'évaluation du statut nutritionnel de plants de tomates de manière quantitatif, non invasif et non destructif est un défi, surtout dans le cas où il est souhaitable de réaliser une technologie à grand déploiement et à faible coût. Un déficit nutritionnel entraîne généralement un ralentissement de la croissance et entraîne un retard ou une diminution de la production. Afin de palier à cette problématique, les travaux de recherche ont porté sur l'évaluation de la possibilité d'utiliser une technologie de vision numérique pour évaluer la teneur en nutriment de la solution nutritive. Cette dernière a été retenue, car elle permettait facilement l'automatisation du procédé d'évaluation et n'implique pas de modification majeure aux installations existantes d'une serre, qu'elle soit résidentielle ou commerciale.

Les premières sections de ce chapitre ont été consacrées à la contribution de ce mémoire, soit à la présentation du protocole expérimental, des montages expérimentaux, à la calibration des caméras utilisées pour les essais et à la présentation du prétraitement des données brutes. Par la suite, les données récoltées durant les deux périodes d'essais ont été présentées sous forme de courbes (signaux de l'indice) de fluorescence pour chacun des groupes ayant une concentration en nutriments différente, soit 0, 400, 800, 1200 et 1600 ppm. L'analyse des résultats de l'été 2015 et de l'automne 2015 a été effectuée séparément puisqu'il y a eu une modification du contexte expérimental par l'augmentation de la densité de plants dans la chambre de croissance, l'utilisation de plants de tomates moins âgés et par l'ajout d'un dispositif de prise de mesure automatisée. Ces modifications

ont été nécessaires afin de rendre le système plus autonome et répondre à un besoin réel dans un contexte de serres sans surveillance humaine.

Les résultats obtenus ont permis d'identifier que l'utilisation des ratios des points de la courbe de fluorescence M/S et P/M permettait de différencier significativement chacun des groupes de l'essai pour les deux périodes.

Chapitre 4

Conclusion et travaux futurs

Dans un premier temps, il a été possible de démontrer que, dans un système hydroponique en circuit fluidique fermé, la concentration en nutriment et la masse d'eau du système étaient perturbées par l'absorption de ces éléments par les plants de tomate. L'ajout de deux compensateurs de niveau d'eau et de nutriment permet de résoudre ce problème. Cependant, il est fortement recommandé d'utiliser un système de surveillance indépendant afin de détecter les défaillances ou une modification du système indépendant du système asservi, par exemple lors d'un bris des pompes utilisés dans le système de compensation ou l'accumulation de biofilm dans les canalisations utilisées pour le circuit de distribution de la solution nutritive. Pour ce faire, il a été proposé d'utiliser un système de vision numérique basé sur la technologie Raspberry Pi. Cette dernière a été retenue puisqu'elle est libre de droits et très abordable. De plus, cette dernière est supportée par une grande communauté d'utilisateur et de développeur.

Suite au développement itératif de deux montages expérimentaux, il a été possible de confirmer l'hypothèse suivante : il est possible d'observer une différence significative de l'indice lié au phénomène de la fluorescence de la chlorophylle mesuré à l'aide d'un dispositif Raspberry Pi et d'une caméra Raspberry Pi NoIR en fonction de la concentration en nutriment de la solution.

La validité des résultats obtenus possède cependant certaines limitations. Premièrement, les valeurs de concentration utilisées pour l'essai étaient fixées à 0 ppm et de 1200 ppm pour la période de l'été 2015 et à 400 ppm, 800 ppm et de 1600 ppm pour la période de

l'automne 2015, suite à une amélioration majeur du montage expérimental. La valeur l'indice lié à la fluorescence mesurée était pour des concentrations fixes. Par conséquent, le temps de réponse avant qu'il y ait une modification de la fluorescence suite à un changement de concentration est inconnu. Ce délai a un impact direct sur le temps de réaction suite à la détection d'une anomalie dans le système. De plus, le comportement transitoire de la valeur de l'indice lié à la fluorescence entre deux concentrations n'a pas été évalué dans ce projet. Une caractérisation de ces paramètres devra être effectuée afin de valider leur impact sur la détection des anomalies.

Les essais se sont déroulés en chambre de croissance. L'espace disponible à l'intérieur de celle-ci était limité, mais favorisait le contrôle de l'environnement. Le nombre de plants pouvant y entrer était restreint par cet espace, ce qui limite les comparaisons entre chaque groupe.

La technologie développée était orientée pour effectuer des mesures à grande échelle. Par conséquent, il n'était possible que de prendre une seule mesure quotidiennement pour chacun des groupes. De plus, ces mesures n'ont pas été répétées sur d'autres plants. Or, il n'est pas possible d'indiquer que les résultats obtenus seraient les mêmes avec d'autres groupes. Les conditions environnementales de la chambre de croissance diffèrent des conditions à sein des différentes serres commerciales. Il est impossible d'indiquer avec certitude que les résultats obtenus pourront être dupliqués dans un environnement différent ou dans des essais différents. Afin de s'assurer que les mesures de la fluorescence de la chlorophylle ne varient pas en fonction des conditions environnementales, une analyse de sensibilité portant sur ces conditions devra être

effectuée, car ces dernières peuvent varier en fonction de la culture ou de la position géographique des serres.

Les essais se sont limités à un seul cultivar, soit la tomate d'Alaska. Considérant la variation des caractéristiques entre les divers cultivars, il est possible que les mesures de la fluorescence de la chlorophylle soient différentes. Par conséquent, le processus de caractérisation devrait être repris avec d'autres variétés afin de déterminer si cela a un impact sur les mesures. De plus, considérant la facilité d'implantation et sa grande adaptabilité, la technique pourrait être facilement transposée vers d'autres cultures.

Travaux futurs

Afin de pallier aux limitations décrites précédemment, plusieurs essais devront être étudiés avant d'obtenir une technologie commercialement viable. Les influences des différents paramètres des serres doivent être connues afin de s'assurer de la validité des résultats. Dans un premier temps, l'évaluation de l'impact de la solution nutritive provenant de différents fournisseurs devra être effectuée puisque ces dernières sont composées de plusieurs éléments à des concentrations différentes. Ces concentrations ont un impact sur la croissance des plants [41]. Par conséquent, il est possible que la fluorescence soit affectée. La stratégie de maintien adopté pour les essais était de maintenir le niveau de solutions des bacs de culture à un niveau constant en ajoutant de l'eau. Cependant, la concentration de chaque nutriment était difficile à compenser rigoureusement, voir impossible. Ainsi, dans le protocole expérimental, il a été choisi de remplacer la totalité de la solution lorsque cette dernière atteignait un seuil minimal. La solution mise au rebut contient encore une certaine quantité de nutriment dont la

caractérisation n'a pas été complétée. Du point de vue économique et environnemental, la régénération de cette solution dans un système à solution recirculé permettrait d'obtenir un meilleur retour sur investissement et diminuerait les impacts environnementaux. De plus, l'impact de la régénération de la solution sur les mesures effectuées n'a pas été évalué. L'accumulation d'ions ballast et de microélément pourrait dépasser un seuil de toxicité et affecter la croissance et la production des plants. L'élaboration de solutions nutritives concentrées spécifique à ce type de système permettrait d'éviter ce problème.

Les essais effectués en chambre de croissance ont permis de maintenir les conditions environnementales stables tout au long des essais. Les conditions environnementales réelles d'utilisation de la technologie varient des conditions des essais. L'humidité relative, la température et l'éclairage sont plus difficiles à maintenir dans les serres de productions commerciales. Lors des essais, il était possible de prendre des mesures sur des plants étant adaptés à une noirceur totale. Cependant, dans les conditions réelles, il est possible d'avoir des sources d'éclairage parasite provenant des lumières de sécurité ou de l'extérieur de la serre. L'impact de ces éclairages n'a pas été évalué dans ces essais. Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer leurs impacts sur les mesures et d'établir une méthode de traitement des données obtenues avec un éclairage parasite. Probablement que le filtre utilisé sur le montage actuel serait suffisant, mais il n'a pas été testé.

Pour finir, une optimisation de la chaîne de traitement devra être effectuée afin de minimiser l'influence du bruit sur les mesures. Ce bruit provenait principalement du mouvement des feuilles soumis à la ventilation dans la chambre de croissance. L'élimination de ce bruit permettrait d'augmenter la précision des mesures et la performance du système de surveillance. Cependant, ce bruit se retrouvera aussi dans les

serres d'où l'importance de le considérer. De plus, l'optimisation des paramètres de la caméra Raspberry Pi pourrait permettre une diminution significative du bruit provenant du système d'acquisition.

Référence

- [1] Groupe AGÉCO, "Portrait québécois et diagnostique de la production de légumes en serre et opportunité de développement," 2011.
- [2] H. ZHIGUO, H. JING, and G. QUN, "Method for confirming actinic light intensity in chlorophyll fluorescence induction curve " China Patent CN20111253348 20110830 2013.
- [3] H. ZHIGUO, G. QUN, G. FENG, H. JING, H. TAO, and Z. HONGBING, "System for remotely and wirelessly monitoring plant chlorophyll fluorescence," China Patent CN20111254698 20110831 2013.
- [4] R. W. Hunt, S. Chinnasamy, K. C. Das, and E. R. de Mattos, "Biological optimization systems for enhancing photosynthetic efficiency and methods of use," United-States Patent, 2012.
- [5] J. B. J. Jr, "Hydroponics A Practical Guide for the Soilless Grower 2e " pp. 72-113, 2005.
- [6] Y. L. Li, C. Stanghellini, and H. Challa, "Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* L.)," *Scientia Horticulturae*, vol. 88, pp. 11-29, 2001.
- [7] A. J. S. Neto, S. Zolnier, and D. de Carvalho Lopes, "Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 103, pp. 17-25, 2014.
- [8] P. Santamaria, G. Campanile, A. Parente, and A. Elia, "Subirrigation vs drip-irrigation: Effects on yield and quality of soilless grown cherry tomato," *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, vol. 78, pp. 290-296, 2003.
- [9] G. Carmassi, L. Incrocci, R. Maggini, F. Malorgio, F. Tognoni, and A. Pardossi, "Modeling salinity build-up in recirculating nutrient solution culture," *Journal of plant nutrition*, vol. 28, pp. 431-445, 2005.
- [10] G. Carmassi, L. Incrocci, R. Maggini, F. Malorgio, F. Tognoni, and A. Pardossi, "An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rockwool culture with saline water," *Agricultural Water Management*, vol. 88, pp. 73-82, 3/16/ 2007.
- [11] D. Massa, L. Incrocci, R. Maggini, G. Carmassi, C. A. Campiotti, and A. Pardossi, "Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato," *Agricultural Water Management*, vol. 97, pp. 971-980, 7// 2010.
- [12] H. Zekki, L. Gauthier, and A. Gosselin, "Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling," *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 121, pp. 1082-1088, 1996.
- [13] M. Pala, L. Mizenko, M. Mach, and T. Reed, "Aeroponic Greenhouse as an Autonomous System Using Intelligent Space for Agriculture Robotics," vol. 274, pp. 83-93, 2014.

- [14] I. Lee, P. Fynn, and T. Short, "Development and evaluation of a computer-controlled fertigation system," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 16, pp. 279-284, 2000.
- [15] D. Massa, L. Incrocci, R. Maggini, C. Bibbiani, G. Carmassi, F. Malorgio, *et al.*, "Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture," *Environmental Modelling & Software*, vol. 26, pp. 711-722, 2011.
- [16] D. Massa, N. S. Mattson, and H. J. Lieth, "Effects of saline root environment (NaCl) on nitrate and potassium uptake kinetics for rose plants: a Michaelis-Menten modelling approach," *Plant and soil*, vol. 318, pp. 101-115, 2009.
- [17] T. Morimoto, K. Hatou, and Y. Hashimoto, "Intelligent control for a plant production system," *Control Engineering Practice*, vol. 4, pp. 773-784, 6// 1996.
- [18] T. Morimoto and Y. Hashimoto, "An intelligent control for greenhouse automation, oriented by the concepts of SPA and SFA — an application to a post-harvest process," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 29, pp. 3-20, 10// 2000.
- [19] K. Roháček and M. Barták, "Technique of the Modulated Chlorophyll Fluorescence: Basic Concepts, Useful Parameters, and Some Applications," *Photosynthetica*, vol. 37, pp. 339-363, 1999.
- [20] H. Nishina, "Development of Speaking Plant Approach Technique for Intelligent Greenhouse," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 3, pp. 9-13, 2015.
- [21] National Center for Biotechnology Information. (2015, 2015-11-30). *PubChem Compound Database* :Chlorophyll A. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/12085802>
- [22] M. Borhan, S. Panigrahi, J. Lorenzen, and H. Gu, "Multispectral and color imaging techniques for nitrate and chlorophyll determination of potato leaves in a controlled environment," *Transactions of the ASAE*, vol. 47, pp. 599-608, 2004.
- [23] L. Chaerle, I. Leinonen, H. G. Jones, and D. Van Der Straeten, "Monitoring and screening plant populations with combined thermal and chlorophyll fluorescence imaging," *Journal of Experimental Botany*, vol. 58, pp. 773-784, 2007.
- [24] J. Davenport, R. Stevens, E. Perry, and N. Lang, "Leaf spectral reflectance for nondestructive measurement of plant nutrient status," *Horttechnology*, vol. 15, pp. 31-35, 2005.
- [25] L. Chaerle and D. Van Der Straeten, "Seeing is believing: imaging techniques to monitor plant health," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Gene Structure and Expression*, vol. 1519, pp. 153-166, 2001.
- [26] T. Abboud, M. Bamsey, A.-L. Paul, T. Graham, S. Braham, R. Noumeir, *et al.*, "Deployment of a fully-automated green fluorescent protein imaging system in a high arctic autonomous greenhouse," *Sensors*, vol. 13, pp. 3530-3548, 2013.
- [27] T. Abboud, A. Berinstain, M. Bamsey, R. Ferl, A.-L. Paul, T. Graham, *et al.*, "Multispectral plant health imaging system for space biology and hypobaric plant growth studies," *Insciencas J.*, vol. 3, pp. 24-44, 2013.
- [28] A. Lavrov, A. Utkin, J. M. da Silva, R. Vilar, N. Santos, and B. Alves, "Water stress assessment of cork oak leaves and maritime pine needles based on LIF spectra," *Optics and Spectroscopy*, vol. 112, pp. 271-279, 2012.

- [29] U. Ahmad, D. M. Subrata, and C. Arif, "Speaking Plant Approach for Automatic Fertigation System in Greenhouse," *arXiv preprint arXiv:1303.1869*, 2013.
- [30] D. Tomkiewicz and T. Piskier, "A plant based sensing method for nutrition stress monitoring," *Precision Agriculture*, vol. 13, pp. 370-383, 2011.
- [31] R. F. Muñoz-Huerta, A. d. J. Ortiz-Melendez, R. G. Guevara-Gonzalez, I. Torres-Pacheco, G. Herrera-Ruiz, L. M. Contreras-Medina, *et al.*, "An Analysis of Electrical Impedance Measurements Applied for Plant N Status Estimation in Lettuce (*Lactuca sativa*)," *Sensors*, vol. 14, pp. 11492-11503, 2014.
- [32] D. Gilchrist, "Programmed cell death in plant disease: the purpose and promise of cellular suicide," *Annual review of phytopathology*, vol. 36, pp. 393-414, 1998.
- [33] Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des Affaires rural de l'Ontario. (2014, 2016-02-29). *Sanitation Guidelines for Management of Pests and Diseases of Greenhouse Vegetables*. Available: <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/14-034.htm>
- [34] D. E. Nathan M. Kleczewski, "Sanitation for Disease and Pest Management," *Purdue university*, 2011.
- [35] E. J. Lee, H. Wi, A. L. McEwan, A. Farooq, H. Sohal, E. J. Woo, *et al.*, "Design of a microscopic electrical impedance tomography system for 3D continuous non-destructive monitoring of tissue culture," *Biomedical engineering online*, vol. 13, p. 142, 2014.
- [36] Y. Chen, Z. Zhang, Y. Liu, Y. Zhu, and H. Cao, "Models of Dry Matter Production and Yield Formation for the Protected Tomato," in *Computer and Computing Technologies in Agriculture V*, ed: Springer, 2012, pp. 278-292.
- [37] M. Pessarakli, "Approches to Measuring Plant Bioproductivity and Growth," in *Handbook of Photosynthesis* M. Pessarakli, Ed., ed: CRC Press, 1996, pp. 699-716.
- [38] A. Al-Azzawi, *Photonics: Principles and Practices*: CRC Press, 2006.
- [39] F. M. McNeill and E. Thro, *Fuzzy logic: a practical approach*: Academic Press, 2014.
- [40] I. Iancu, *A Mamdani type fuzzy logic controller*: INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [41] A. Heeb, B. Lundegårdh, G. Savage, and T. Ericsson, "Impact of organic and inorganic fertilizers on yield, taste, and nutritional quality of tomatoes," *Journal of plant nutrition and soil science*, vol. 169, pp. 535-541, 2006.
- [42] A. Pardossi, F. Malorgio, L. Incrocci, G. Carmassi, R. Maggini, D. Massa, *et al.*, "Simplified models for the water relations of soilless cultures: what they do or suggest for sustainable water use in intensive horticulture," *Acta horticulturae*, 2006.
- [43] APOGEE INSTRUMENTS INC., "Owner's manual Chlorophyll concentration meter Model MC-100," 2014.
- [44] Konica Minolta, "Chlorophyll meter SPAD-502plus," 1997.
- [45] M. Meroni, M. Rossini, L. Guanter, L. Alonso, U. Rascher, R. Colombo, *et al.*, "Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 2037-2051, 2009.

- [46] C. Olympios, "Overview of soilless culture: Advantages, constraints and perspectives for its use in Mediterranean countries," *Cahiers Options Méditerranéennes*, vol. 31, pp. 307-324, 1999.
- [47] J. Pucheta, H. Patiño, R. Fullana, C. Schugurensky, and B. Kuchen, "A Neuro-Dynamic Programming-Based Optimal Controller for Tomato Seedling Growth in Greenhouse Systems," *Neural Processing Letters*, vol. 24, pp. 241-260, 2006.