

Optimisation de la fertirrigation en culture de fraises hors-sol

Léa Zerbino

▶ **To cite this version:**

Léa Zerbino. Optimisation de la fertirrigation en culture de fraises hors-sol. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-01886620

HAL Id: dumas-01886620

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01886620

Submitted on 3 Oct 2018

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

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

AGROCAMPUS OUEST

☑ **CFR Angers**

☐ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2017-2018 Spécialité : Horticulture Spécialisation (et option éventuelle) : Ingénierie des Productions et des Produits de l'Horticulture (I2PH)	**Mémoire de fin d'études** ☑ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage ☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Optimisation de la fertirrigation en culture de fraises hors-sol

Par : Léa ZERBINO



Soutenu à Angers, le 7 septembre 2018

Devant le jury composé de :

Président : Etienne Chantoiseau

Maître de stage : Nicolas Fedou

Enseignant référent : Patrice Cannavo

Autres membres du jury :

Philippe Morel, Ingénieur INRA en agronomie horticole

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr

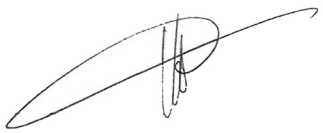
Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

☑ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible [1].

Date et signature du **maître de stage** [2] :
(ou de l'étudiant-entrepreneur)



A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur[3] **Nom Prénom : Zerbino Léa**
autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☑ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☑ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) ☐ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'**auteur** :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.
Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'**enseignant** :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.
(2) Signature et cachet de l'organisme
(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études
(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adressent à Nicolas Fedou qui, malgré son manque de temps consacré au projet pour cette deuxième année, s'est rendu disponible régulièrement et a su me guider dans mes démarches tout en me laissant beaucoup d'autonomie sur l'étude.

Je tiens également à remercier Nathalie Deschamp pour ses propositions et ses explications lors de visites chez divers producteurs. Elle m'a fait découvrir plusieurs aspects de la Chambre d'Agriculture qui m'ont permis de comprendre l'importance du soutien, du conseil et de la sensibilisation auprès des agriculteurs et du grand public.

Je remercie le reste de l'équipe "Fraises", notamment Sylvie Valbuzzi qui a su prendre du temps pour m'apporter toutes les informations techniques et scientifiques concernant la production de fraises en Nouvelle-Aquitaine. Mes remerciements vont aussi à l'entreprise Connecting-Nature pour les échanges concernant l'amélioration du logiciel de récupération de données, et à la société Padula qui a fourni le matériel de mesure pour l'étude des supports de culture.

Je souhaite également remercier mon tuteur de stage Patrice Cannavo pour son accompagnement et sa réactivité lors de mes questionnements sur différents aspects de mon stage.

Je remercie particulièrement Thierry, Serafim, Jean-Marie et Patricia qui m'ont laissé accéder à leurs parcelles, et ont pris du temps pour me parler de leur production durant ces six derniers mois. Une petite pensée va également aux autres producteurs que j'ai rencontré et avec qui j'ai pu échanger tout au long de mon stage sur la production de fraise, mais aussi d'autres cultures présentes en Dordogne.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont pris le temps de relire ce rapport, de me faire leurs commentaires et de m'aiguiller dans mes choix rédactionnels.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS…… I
TABLE DES MATIERES…….. II
GLOSSAIRE……... IV
LISTE DES ABREVIATIONS……... V
TABLE DES ILLUSTRATIONS…….. VI
TABLE DES TABLEAUX…….. VII

Introduction 1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique..... 3
1. Aperçu de la culture..... 4
1.1 Organisation d'un cycle de culture.....4
1.2 Principaux stades de développement 5
1.3 Effets du changement climatique.....6
2. Substrats..... 8
2.1 Propriétés.....8
2.2 Matériaux 11
3. Eléments nutritifs 12
3.1 Rôle des éléments nutritifs.....12
3.2 Solutions nutritives.....13
4. Irrigation 14
4.1 L'eau et la plante.....14
4.2 Bilan hydrique et tensiométrie 15
4.3 Irrigation de précision 16
5. Fertirrigation..... 17
5.1 Composants et fonctionnement du système 17
5.2 Salinité et conductivité 18
Chapitre 2 : Matériel et Méthode 19
1. Matériel de production..... 19
2. Matériel de mesure 21
3. Méthode d'analyse..... 24
3.1 Récupération et traitement de données 24
3.2 Analyse statistique.....26
Chapitre 3 : Résultats..... 27

1. Régime d'irrigation 27
2. Substrats 29
3. Installations 30
Chapitre 4 : Discussion 31
1. Pilotage de l'irrigation 31
2. Conductivité et substrats 32
3. Investissements dans les installations 34
Conclusion 36
Sitographie 37
Bibliographie 38
Annexes 43
Annexe I 43
Annexe II 44
Annexe III 45
Annexe IV 46

GLOSSAIRE

Conductivité : capacité d'un matériau à laisser passer et conduire le courant électrique. Elle se mesure en milli-Siemens par centimètre (mS/cm) à l'aide d'un conductimètre. L'inverse est la résistivité du matériau (Peltier, 2017).

Culture hors-sol : culture dont les racines des plantes reposent dans un milieu reconstitué, détaché du sol. Le substrat, minéral ou organique, est neutre et inerte, et peut être d'origine industrielle. Ce milieu de culture est irrigué de façon régulière par des solutions nutritives adéquates à la plante cultivée (Dietimiam, 2007).

Fertirrigation : conjugaison d'une alimentation hydrique et d'une nutrition minérale afin d'apporter une solution nutritive aux cultures lors de l'arrosage. Aussi appelée « fertigation » ou « irrigation fertilisante » (Encyclopædia Universalis, 2018).

Mini-trayplant ou eco-plant : méthode pas encore standardisée, stolon repiqué sur motte et élevé pendant 2 à 3 mois à faible densité, puis conservé comme les trayplants (Carmentran-Delias, 2016).

Plant frigo : plan prélevé en pépinière, arraché au repos végétatif, conservé en frigo à -2°C jusqu'à la veille de la plantation. Plant ne pouvant être conservé plus de 6 mois (Carmentran-Delias, 2016).

Plant motte : 3 types différents : motte, motte gelée et motte d'altitude. Le plant motte est un stolon raciné sur une motte, élevé pendant 3 à 4 semaines (Carmentran-Delias, 2016).

Solarimètre : instrument permettant de mesurer une intensité lumineuse en W/m2. Il est utilisé pour piloter l'irrigation dans les serres en fonction de l'intensité du rayonnement solaire (Guérineau et al., 2003).

Trayplant : plant produit à partir d'un stolon (ou d'une motte), repiqué début août sur une motte conique d'un diamètre de 8 cm. Il grossit pendant l'automne sous aspersion fertilisante, chez un pépiniériste ou chez le producteur en suivant certaines règles. En fonction de la date de plantation souhaitée, la dose de froid doit être maîtrisée par un passage en frigo. La production est précoce, de bonne qualité et avec un rendement aux alentours de 400 g de fruits par plant (Guérineau, 2003). Conservation du plant en frigo entre 0 et 2°C pendant environ 1 mois, ou mise en frigo dit de conservation à -2°C après un arrêt de végétation de 4 à 9 mois (Carmentran-Delias, 2016)

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : analyse en composante principale
BBCH : biologische bundesanstalt, bundessortenamt und chemische industrie, code des stades phénologiques des plantes cultivées
CA : chambre d'agriculture
CE ou Ec : conductivité électrique en mS/cm
CEC : capacité d'échange cationique
CIREF : centre inter-régional de recherche et d'expérimentation de la fraise
CTIFL : centre technique interprofessionnel des fruits et légumes
ET_0 : évapotranspiration
ETM : évapotranspiration maximale
GES : gaz à effet de serre
GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
Kc : coefficient cultural
NADH / NADPH : nicotinamide adénine dinucléotide phosphate, coenzyme
PBI : protection biologique intégrée
RFU : réserve facilement utilisable
WUE : water use efficiency, efficacité d'utilisation de l'eau

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Le cycle de production du fraisier en sol - variétés de jours courts (Guérineau et al., 2003) 4
Figure 2: Exemples des types de courbes de rétention d'eau de différents matériaux utilisés comme support de culture pour le hors-sol. La production de fraises se fait essentiellement sur de l'écorce compostée, du mélange tourbe/écorce et des fibres de coco (Michel, 2010) 9
Figure 3 : schéma d'une installation type pour une production hors-sol en circuit ouvert ou fermé (Pardossi et al., 2011) 17
Figure 4 : photographies des installations des quatre parcelles prises le 15/05/2018 dans le Val de Caudeau Louyre (24) (Léa Zerbino) 19
Figure 5 : Schéma de la station de récupération de données sur la parcelle 3 ; les parcelles 1, 2 et 4 ne possèdent pas de tensiomètres, mais ont le même type d'installation (document interne, 2017) 22
Figure 6 : vue de l'outil récupérateur de données installé sur la parcelle 3 avec les deux sondes capacitives dans des seaux. Les autres parcelles sont équipées avec des syphons permettant aux sondes de toujours être en contact avec l'eau (photographie prise le 15/05/2018 dans le Val de Caudeau Louyre, par Léa Zerbino) 22
Figure 7 : stades, périodes de sensibilité au stress hydrique et coefficients culturaux sur une variété de saison (document interne, 2016) 24
Figure 8 : schématisation de la méthode de calcul du bilan hydrique en fonction des éléments du système (Zerbino, 2018) 25
Figure 9 : évolution et comparaison des volumes apportés (—), volumes consommés (- - -), et besoins théoriques (═) pour les quatre parcelles sur toute la saison de production. Les valeurs hors cadre restent inférieures à 600 ml/jour pour les parcelles 2 et 3. 28
Figure 10 : évolution et comparaison des conductivités (Ec) sur le mois de mai à l'apport (A), dans le sac (B) et au drainage (C) pour les quatre parcelles 29

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Stades phénologiques du plant de fraisier (Fragaria ananassa Duch.) selon la classification du BBCH (Bleiholder et al., 2001) 6
Tableau 2 : préconisations d'un équilibre de la solution nutritive en meq/l établies par Raynal Lacroix (2012) et Izard et al. (2010) pour des variétés remontantes. 13
Tableau 3 : correspondance entre un milliéquivalent (meq) et une masse d'ion ou d'élément minéral (mg) (Odet et al., 1989) 18
Tableau 4 : descriptif des quatre parcelles et de leurs équipements 20
Tableau 5 : cumul des volumes apportés (Vol app), consommés (Vol cons) et drainés (Vol dr) par plant pour les quatre parcelles sur les mois de mai, juin et juillet. Les besoins théoriques sont exprimés sous la forme de l'ETM 27
Tableau 6 : valeurs moyennes et écarts types des quantités d'eau apportées en ml par jour sur la saison de production pour les parcelles 3 et 4. Ces valeurs sont mesurées sur les 5 m étudiés tout au long du projet 29
Tableau 7 : valeurs moyennes et écarts types de la conductivité dans le sac en mS/cm de chaque parcelle sur la saison de production. L'écart type témoigne des fluctuations observées sur les graphiques 3029
Tableau 8 : moyennes des températures (T°max en °C) et humidités (H en %) maximales observées sur chaque parcelle sur toute la saison de production 30

Introduction

Le département de la Dordogne abrite aujourd'hui près de trente filières agricoles différentes. La fraise en est une des principales en termes de surface, mais surtout de valeur économique. L'évolution des techniques agricoles couplée aux avancées technologiques poussent les producteurs à se tourner vers de nouveaux modes de production, et sur le département, il s'agit de la culture de fraises hors-sol[*]. Depuis une quinzaine d'année, le hors-sol se développe, mais la gestion des itinéraires culturaux n'évolue pas à la même vitesse. C'est notamment le cas en ce qui concerne la gestion de l'irrigation fertilisante, indispensable à ce type de production. Bien que les agriculteurs se tournent vers le respect de l'environnement et la modification des pratiques culturales notamment via l'agriculture de précision, de nombreux facteurs et acteurs entre en jeu dans la gestion de la ressource en eau. En effet, la répartition et l'utilisation de la ressource évoluent continuellement, et l'influence du changement climatique ne cesse de les accentuer. L'augmentation des températures provoquant des combinaisons de stress pour les plantes et les milieux aquatiques (retenue d'eau, bassin versant…), une nouvelle gestion de la ressource semble indispensable.

C'est donc dans l'optique d'accompagner au mieux les fraisiculteurs désireux d'améliorer leurs pratiques, que la Chambre d'Agriculture de Dordogne a souhaité intervenir grâce au projet Fertirrigation. Le statut de cette institution permet de mettre en place des essais directement chez les producteurs, et de pouvoir travailler en étroite collaboration avec eux. Pour cette étude, les objectifs sont nombreux et continuent d'évoluer au fur et à mesure des années. La deuxième année du projet doit couvrir les objectifs suivants :

- Créer un référentiel de pilotage pour les producteurs et les conseillers techniques
    - Étalonner les sondes déjà en place afin d'en faire des valeurs de référence (vérifier la pertinence des valeurs mesurées depuis trois ans) afin d'apporter des solutions techniques précises (agriculture de précision), appliquées et adaptées au bassin de production
    - Accompagner des fraisiculteurs souhaitant mieux piloter leur irrigation
    - Optimiser la gestion actuelle de l'eau quantitativement et qualitativement tout en maintenant voire, en améliorant la qualité des fruits et les rendements
    - Déterminer le confort hydrique du plant de fraisier et ses besoins optimaux en éléments minéraux selon ses stades de développement
- Participer au développement d'un logiciel / application smartphone de pilotage pour les fraisiculteurs en fonction de leurs besoins

Ce mémoire est la base du référentiel, et s'oriente autour de la problématique suivante : **par quels moyens accompagner la mise en place d'une conduite innovante dans un contexte de réduction de la ressource en eau en culture de fraises hors sol ?**

Les sous objectifs évoqués précédemment mettent en évidence plusieurs points pouvant avoir un impact sur la conduite de la culture. Les axes de travail vont alors s'orienter autour *1) des régimes d'irrigation actuels, 2) de la variabilité des substrats,* et *3) des différences entre les installations possibles*.

[*] cf glossaire p. IV

Un suivi technique de la fertirrigation* actuelle sur quatre parcelles de référence, formera la base de données du référentiel. Complétés par des données scientifiques, les éléments seront ensuite comparés afin de déterminer leurs avantages respectifs. L'intérêt sera alors de formuler des préconisations spécifiques à chaque producteur afin de lui assurer des gains matériels et/ou économiques.

Dans un premier temps, une synthèse bibliographique replacera la culture de fraise hors-sol dans son contexte et en détaillera l'itinéraire cultural. Une deuxième partie sera consacrée à la description du matériel végétal, du matériel de mesure et des méthodes d'analyse utilisées dans ce projet. La troisième partie fera office de récapitulatif des résultats obtenus, avant la dernière qui permettra de les analyser et d'en discuter.

* cf glossaire p. IV

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Depuis plus d'un siècle, les productions à forte valeur ajoutée ont tendance à appauvrir, voire détruire, les sols sur lesquels elles sont cultivées. En effet, l'intensification dont elles font l'objet contraint souvent à l'emploi de produits chimiques afin de pallier les problèmes de sols en mauvaise santé. Ce fut notamment le cas aux Etats Unis et en Europe avec le bromure de méthyle, gaz incolore et inodore aux propriétés fongicides largement employé pour « purifier » les sols avant la mise en culture (Peltier, 2017). Mais en 1992, le protocole de Montréal l'inscrit sur la liste des substances participant à la réduction de la couche d'ozone, et en 2005, son utilisation devient totalement interdite dans l'Union Européenne (Ajwa et al., 2003). Très utilisé pour la production de fraise (*Fragaria x ananassa* Duch.), il a fallu trouver des alternatives afin de lutter contre les nématodes et autres pathogènes du sol. L'efficacité d'autres produits chimiques a été testée, souvent avec un problème de phytotoxicité, ou encore la recherche d'autres méthodes non chimiques (solarisation, fumigation…). Cependant, la solution de plus en plus employée par les producteurs n'est autre que la culture hors-sol qui permet de s'affranchir des adventices et des pathogènes telluriques (Ajwa et al., 2003 ; Coquelet et al., 2003 ; Cantliffe et al., 2007).

La culture hors sol se définit comme un mode de production dans lequel les plantes se développent dans des conditions reconstituées et détachées du sol (Gruda, 2009). Elle facilite la gestion de l'irrigation et de la nutrition des plants, ce qui permet d'obtenir une production plus précoce, à des prix forcément plus intéressants pour les producteurs, avec notamment le développement de marchés de niche (Cantliffe et al., 2007 ; Banaeian et al., 2011 ; Lieten, 2013). De plus, un mode de production hors sol est aussi avantageux en ce qui concerne les conditions de travail (réduction de la pénibilité, augmentation de la vitesse), mais aussi pour ce qui est de la qualité des fruits en termes d'homogénéité du calibre et de la coloration (Coquelet et al., 2003 ; Lieten, 2013). En revanche, les installations nécessitent certains investissements (grands tunnels moins favorables au développement de *Botrytis cinerea*, plus chers à la mise en place), des coûts de productions élevés et un suivi technique important (Coquelet et al., 2003 ; Neri et al., 2012). Ce mode de production fait inévitablement accroître la demande des producteurs vis-à-vis de nouveaux problèmes physiologiques ou nutritionnels des cultures (Lieten, 2013).

Aujourd'hui, il existe deux classes de cultivars de fraisiers cultivés censés minimiser ce type de problème : cultivars à jours courts, à jours neutres (remontants). Il existe également plusieurs types de plants dont trois principalement utilisés : les plants mottes*, les plants frigo* et les tray-plants* (Lieten, 2013 ; Cormier, 2015). Ces derniers prédominent sur le marché de plants depuis les années 1990 grâce à leur bonne capacité de reprise, leur taille au repiquage et leur productivité. Il ne reste pas moins important de bien piloter la fertirrigation qui permet un bon développement de la plante, de son architecture, du nombre de fleurs et de hampes (Lieten, 2013). En Europe, le marché de la fraise continue de se développer essentiellement grâce à l'apparition de la culture hors-sol et des variétés précoces. En 2012, 30% de la production aux Pays Bas et en Belgique était hors-sol. En 2015 en France, la culture de fraises sous serre représentait 1842 ha, dont 698 ha (soit 38 %) produits en hors-sol avec les variétés populaires telles que la Gariguette, la Charlotte ou encore la Mara des Bois (Neri et al., 2012 ; CTIFL Balandran, 2017 ; Agreste, 2017). Étant la principale région productrice de France, la Nouvelle Aquitaine regroupe 48 % du hors-sol français, dont 58 % se trouvent en abris froid (CTIFL Balandran, 2017 ; Agreste, 2017).

* cf glossaire p. IV

Malheureusement, ce mode de conduite est plus difficile à maîtriser qu'il n'y paraît. La fraise fait maintenant partie des productions cultivables sous des conditions climatiques très différentes, ce qui en fait un sujet d'étude relativement complexe (Palencia et al., 2009). Elle peut s'adapter à beaucoup de conditions, bien qu'elle soit souvent considérée comme une espèce sensible. En outre, la demande se fait de plus en plus exigeante vis-à-vis de l'utilisation de produits chimiques sur les cultures. L'enjeu est donc de taille pour les producteurs, particulièrement en ce qui concerne la culture de fraise hors-sol, pour laquelle il faut tenir compte des apports en engrais et en produit phytosanitaires, mais également de l'apport en eau. En effet, la ressource en eau est de plus en plus problématique surtout à cause de la diversité de la demande, et dans le cas présent, de la faible quantité de sol reconstitué pouvant servir de réservoir à la plante (Shock, 2011). Afin de gérer au mieux cette transition, il est aujourd'hui indispensable de connaître les besoins réels de la plante en nutriments et en eau, ainsi que l'ensemble de sa physiologie sur toute sa période de croissance et de production (Parent, 2001 ; Tagliavini et al., 2004 ; 2005).

Beaucoup d'études ont déjà été réalisées par rapport aux conditions de culture du fraisier en sol, et de plus en plus voient le jour en hors-sol. Le Canada et les Etats Unis semblent les plus renseignés à ce sujet, plus spécifiquement en ce qui concerne les substrats et leurs substituts envisageables par des matériaux plus durables (Lemay et al., 2012). Pour l'Europe, « Ortoconci » Project a vu le jour en Italie, et il est orienté sur le volet de l'innovation en matière de maîtrise de la fertirrigation en conditions hors-sol (Quacquarelli et al., 2017). Aujourd'hui, les valeurs-seuil qu'il est possible d'utiliser en tant que valeurs de référence ont, pour la plupart, été obtenues à la suite d'essai de culture en sol (Parent, 2001). Il devient ainsi nécessaire de transposer ces valeurs à un mode de production prenant de plus en plus d'ampleur.

1. Aperçu de la culture

1.1 Organisation d'un cycle de culture

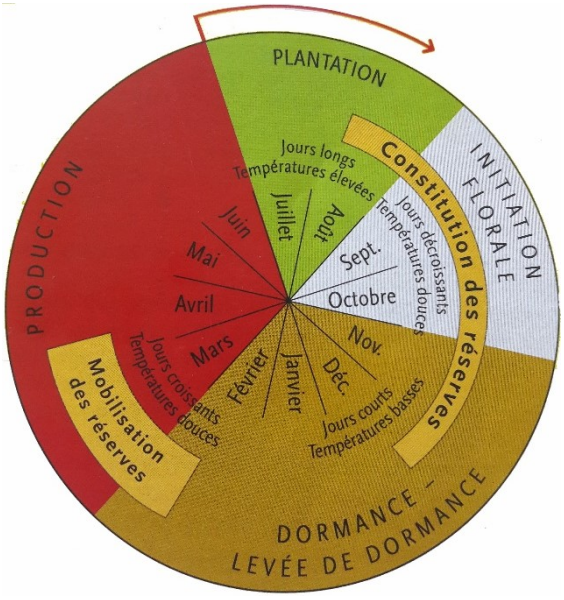


Figure 1 : Le cycle de production du fraisier en sol - variétés de jours courts (Guérineau et al., 2003)

Pour produire des fraises, il est important de choisir sa variété (précoce, saison) et son type d'installation (abri chauffé, abri froid) en fonction du créneau de culture désiré (Netafim, 2012). Le fraisier se décline en trois catégories de variétés, qui ont chacune leurs caractéristiques, et leurs besoins, pour toute la durée de leur cycle de production. Que ce soit des variétés de jours courts, appelées variétés de saison comme *Gariguette* ou *Cléry*, et les variétés remontantes comme *Charlotte* ou *Mara des Bois*, les cycles de culture débutent en année "n-1" (*Figure 1).*

Les plantations en pépinières s'effectuent sur les mois d'été pour les variétés précoces, et peuvent s'étendre jusqu'au début de l'automne pour les variétés plus tardives (Guérineau et al., 2003). La luminosité et les températures de ces périodes permettent la croissance des organes végétatifs, et une mise en réserve des éléments, en vue de la période de repos végétatif. En automne, la diminution de la photopériode favorise l'initiation florale tant que les températures restent supérieures à 7°C.

Les plants sont alors repiqués en serres/tunnels pour passer la période hivernale en état de dormance, et accumuler des heures de froid pour lever partiellement ou totalement la dormance à partir du printemps (Parent et al., 2000 ; Guérineau et al., 2003). Pendant cette période, le taux d'absorption des nutriments est faible à cause de la diminution de l'activité des plants, mais ces derniers contiennent déjà entre 11 et 16 % des quantités de potassium (K) et de calcium (Ca) absorbés sur la totalité d'un cycle. Quasiment un tiers des besoins totaux en azote (N), phosphore (P) et magnésium (Mg) sont également absorbés avant l'entrée en dormance (Tagliavini et al., 2004 ; 2005).

Au printemps, lorsque la photopériode et les températures augmentent, les fraisiers sortent de leur état de dormance lorsque leurs besoins en froid ont été atteints : de 700 à 1200 heures de froid selon les variétés. C'est à cette période qu'a lieu la mobilisation des réserves accumulées avant l'hiver, et la fin de la phase d'initiation florale (Guérineau et al., 2003). Les feuilles se développent, puis les hampes, et enfin les fleurs. Celles-ci passent par plusieurs stades avant la floraison complète début mars pour les variétés les plus précoces. Elles abritent ensuite plusieurs ovules qui devront bénéficier d'une bonne pollinisation afin de ne pas donner des fruits déformés. C'est à cette période que l'absorption de N et Ca est la plus importante. Une fois la pollinisation effectuée, les ovules se développent et transforment le sommet du pédoncule floral en faux fruit (Parent et al., 2000 ; Tagliavini et al., 2004 ; 2005). S'en suit le mûrissement de ce dernier qui passera du stade de fruit vert, à fruit blanc puis fruit rouge en quatre à six semaines selon les conditions climatiques. Dès lors, les éléments N, P et K se concentrent essentiellement dans les fruits, et Ca dans les feuilles pour le maintien de la turgescence des cellules photosynthétiques (Tagliavini et al., 2004 ; 2005).

Les besoins en eau varient eux aussi au cours de la période de production. La période la plus importante commence dès la floraison pour s'étirer sur toute la durée de mûrissement des fruits (Netafim, 2012). En culture hors-sol, la réserve utile des sols est très amoindrie par le faible volume des sacs alors que la physiologie et les besoins du fraisier restent inchangés. Du fait de son système racinaire superficiel, de son importante surface foliaire, et de la forte teneur en eau dans ses fruits ; le fraisier est rapidement sensible au manque d'eau (Grant et al., 2010 ; Cormier, 2015). Ses besoins réels peuvent se mesurer grâce aux coefficients culturaux qui varient de 0,4 à 0,9 selon la période et la localisation (climat) (Netafim, 2012 ; Boyer, 2015).

En revanche, le type de plant et le type d'installation utilisés par les producteurs peuvent complètement bouleverser le cycle de production du fraisier. Certains plants à l'achat ont déjà subi un passage au froid artificiel (frigo) en pépinières. Ceux-ci peuvent entrer en production dès le mois de février s'ils sont cultivés sous abris chauffés, et ainsi avoir un rendement commercial plus important. Les passages au froid artificiel peuvent également être utilisés en complément d'heures de froid naturel, insuffisantes pour lever la dormance des plants. Selon les installations, ce manque de froid peut aussi être compensé par une exposition à des flashs lumineux ultra-violets (Guérineau et al., 2003 ; Lieten, 2013).

1.2 Principaux stades de développement

Le fraisier est une plante vivace aux feuilles en rosette. Elle possède un bourgeon terminal à l'état végétatif qui produit une tige feuillée à entre-nœuds très courts. Cette formation est, dans le cas du fraisier, appelée le cœur, ou la couronne, et donne naissance à des bourgeons axillaires, qui à leur tour, forment un cœur ou un rameau feuillé (Parent et al., 2000). Celui-ci, appelé stolon, sera à l'origine de la multiplication végétative du plant mère, en plusieurs plants filles, lorsque la température sera suffisamment élevée et en jours longs. Les bourgeons axillaires ayant donné un nouveau cœur deviendront les fleurs, puis les fruits (phase reproductive) sous les mêmes

conditions que pour la formation des stolons (Parent et al., 2000 ; Gravel, 2013). Mais pour mieux comprendre le fonctionnement du fraisier, une description plus détaillée de ces stades phénologiques est nécessaire.

Pour la culture de la fraise, le BBCH° a mis en place un code décimal universel afin de caractériser chaque stade phénologique. Ce code différencie dix stades de développement allant de 0 (semences) à 9 (produit de récolte), subdivisé en plusieurs caractéristiques pour toutes les cultures produites à grande échelle (Bleiholder et al., 2001). La fraise n'échappe pas à cette classification avec huit stades décrits, comme présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Stades phénologiques du plant de fraisier (Fragaria ananassa Duch.) selon la classification du BBCH (Bleiholder et al., 2001)

STADE 0	Pousse et développement des bourgeons (dormance et gonflement du bourgeon principal)
STADE 2	Développement des feuilles (émergence de la 1ère feuille, 1ère feuille dépliée, jusqu'à au moins 9 feuilles dépliées)
STADE 4	Développement des stolons et jeunes plants (formation des premiers stolons, premier plant fille, développement racinaire du plant fille, plusieurs plants fille avec racines)
STADE 5	Emergence des inflorescences (1er ensemble de fleur au sommet de la rosette, élongation de l'inflorescence, stade ballon, majorité des fleurs avec pétales qui forment une balle creuse)
STADE 6	Floraison (1ère fleur ouverte jusqu'à toutes les fleurs fanées avec la majorité des pétales tombés)
STADE 7	Développement du fruit (protubérance du réceptacle, akènes nettement visibles sur le réceptacle, formation du fruit vert)
STADE 8	Maturité du fruit (début de maturation, formation du fruit blanc, passage au fruit rose, rouge, récolte principale)
STADE 9	Sénescence et début de dormance (initiation des bourgeons axillaires, nouvelles feuilles, mort des anciennes feuilles)

1.3 Effets du changement climatique

Depuis moins d'une dizaine d'années, les projections des impacts du changement climatique sont de plus en plus pessimistes. Malgré la quantité d'interconnexions entre les différents systèmes, l'agriculture est, depuis peu, reconnue comme un des secteurs dont l'économie sera grandement affectée par l'évolution du climat. Les mesures prises par les états européens concernant la réduction des GES° sont de plus en plus nombreuses, mais évoluent toutefois moins vite que l'augmentation des températures (Palencia et al., 2009 ; Bethere et al., 2016). Dans son dernier rapport publié en juin 2018, le GIEC° a revu ses prévisions en annonçant que le scénario climatique pessimiste prévu en 2014, était devenu le scénario intermédiaire de 2018, en termes d'augmentation des températures. Pour les productions agricoles, le

° cf liste des abréviations p. V

réchauffement global est ainsi le facteur limitant au bon développement des végétaux (Gulen, Eris, 2004 ; Palencia et al., 2009 ; Grant et al., 2010 ; Bethere et al., 2016).

Le changement climatique est connu pour avoir un impact direct sur l'évolution de la phénologie des plantes. Celui-ci a été mis en évidence sur des végétaux sauvages se développant dans des régions climatiques difficiles (montagnes, rocailles, désert…). Des études ont ainsi pu montrer la capacité d'adaptation des végétaux à certaines conditions, mais les plantes de culture ne semblent pas réagir de la même façon (Inouye, 2008 ; Bethere et al., 2016). La hausse des températures est à l'origine d'une modification des cycles de culture (avancée du printemps, gelées tardives, recul de la saison automnale), ou encore d'une augmentation du taux d'évaporation et de la demande en eau des cultures. De cette façon, elle affecte la croissance et la productivité des cultures, et peut également occasionner des dommages sur la viabilité du pollen et la germination (Grant et al., 2010 ; Neri et al., 2012). Enfin, à l'échelle microscopique, une forte hausse ou une alternance brutale des températures est en général associée à des modifications des processus physiologiques. Par exemple, la production de formes actives d'oxygène dans les plantes en cas de stress hydrique s'opère au niveau des enzymes dans le fruit, et en trop grande quantité, peut provoquer une diminution de la qualité gustative des fruits (Gulen, Eris, 2004 ; Palencia et al., 2009).

En ce qui concerne la production de fraises, la hausse des températures globales est également synonyme d'un grand nombre de difficultés. L'avancée de la période de production au printemps affecte les besoins en froid des plants. Ces derniers se développent moins bien, et les risques de gelées plus importants entraînent des pertes sur la première phase de production. Le nombre d'heure de froid (températures inférieures à 7°C) varie en fonction des variétés de 700 à 1000 heures de froid pour lever la dormance des plants. Si ces besoins ne sont pas atteints, il est possible de les compenser par des passages au froid artificiel (frigo), ou l'utilisation de flash lumineux (Izard et al., 2010 ; Lieten, 2013). Une insuffisance de froid se traduit par une mauvaise croissance du plant : un faible développement végétatif pour beaucoup de fleurs qui finissent par donner beaucoup de petits fruits (et inversement en cas de surplus de froid) avant d'épuiser le pied (Parent et al., 2000). Dans tous les cas, une mauvaise gestion du temps d'exposition au froid entraînera une perte de rendement pour le producteur. Un changement de localisation des productions à une latitude plus élevée pourrait permettre de s'affranchir de la compensation des besoins en froid (Bethere et al., 2016).

En complément, des températures élevées ou des écarts brutaux de température pendant la période de production, peuvent aussi créer des dégâts non négligeables sur la culture. Sous l'effet de la chaleur et d'une trop forte intensité lumineuse, les fruits peuvent se déformer et/ou se détériorer rapidement (Neri et al., 2012). De plus, des températures extérieures élevées impliquent un réchauffement des supports de culture de plus en plus important. Celui-ci peut alors entraîner une surcroissance du système racinaire, et faire diminuer le rendement (Lieten, 2013). Enfin, d'un point de vue pratique, des études prévoient une avancée de la floraison, de la première et de la deuxième récolte d'au moins quinze jours d'ici à 2070, ce qui pose des difficultés par rapport à la main d'œuvre disponible (Bethere et al., 2016).

2. Substrats

Dans les cultures classiques, le sol est reconnu pour être un réservoir en eau et en éléments minéraux pour les plantes, mais a également une fonction de support pour le système racinaire. La production hors sol doit regrouper toutes ces caractéristiques en se basant sur les particularités des différents matériaux organiques (tourbe, écorce compostée, fibre de coco…) ou inorganiques (laine de roche, perlite…) utilisables. Leurs coûts peuvent fortement varier d'un substrat à l'autre, ce qui en fait un critère de sélection supplémentaire pour les producteurs. De plus, les supports doivent posséder certaines propriétés chimiques, tout en répondant à des critères d'aération, et de capacité de rétention en eau différents selon les cultures mises en place (Ameri et al., 2012 ; Prémont, 2015 ; Cormier, 2015). Ils doivent également être exempts de maladies, de graines d'adventices, de ravageurs pour les racines, ou de toutes autres substances toxiques, sans pour autant être stériles, et faciliter la nutrition des cultures (Cantliffe et al., 2007 ; Pardossi et al., 2011). Une mauvaise adaptation de ces caractères à la culture pourrait avoir des effets négativement significatifs sur la croissance végétative, la période de floraison et le rendement (Tehranifar et al., 2007).

La culture de fraise impose quelques règles sur le choix des substrats, même si les expérimentations d'Invenio (Ciref) n'ont jamais mis en évidence de différences entre les substrats, à condition d'avoir une conduite adaptée (Coquelet et al., 2003). En effet, celui-ci ne semble pas influencer le nombre de stolons, de feuilles, la taille des cœurs, ou encore le rendement commercial (Cantliffe et al., 2007). Toutefois, il s'est avéré qu'un volume allant de 1,5 l à 2,5 l par plant selon le support de culture, était nécessaire pour un développement optimal des fraisiers (Cormier, 2015). De la même manière, il n'est pas recommandé d'utiliser les sacs plusieurs années de suite lorsqu'il s'agit d'une culture précoce type *Gariguette* afin d'éviter des problèmes de reprise et de perte de vigueur des plants (Izard et al., 2010).

2.1 Propriétés

Comme écrit précédemment, les substrats se définissent par leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Le support de culture doit garantir la stabilité des plants, une forte porosité pour une bonne circulation de l'air et de l'eau, ainsi qu'un pH neutre ou approchant. Selon les composants, la densité apparente est également un critère de choix pour faciliter l'installation des sacs (Pardossi et al., 2011 ; Ameri et al., 2012 ; Prémont, 2015).

Les propriétés physiques sont considérées comme les plus importantes afin de caractériser un support de culture. Elles sont généralement modulées par le diamètre et la répartition des particules composant le substrat, et doivent mettre en avant trois phases. La phase solide doit permettre l'ancrage des plants, la phase liquide doit assurer leur approvisionnement en eau et nutriments, et la phase gazeuse, les transports d'oxygène et de CO2 entre les racines, les micro-organismes et l'environnement extérieur (Pardossi et al., 2011 ; Kerloch, 2016).

(Michel, 2010) rappelle qu'une typographie des différents substrats a été réalisée selon les éléments caractéristiques que sont la porosité totale, la disponibilité en air et en eau (analogue de la RFU[°] dans un système sol), et la capacité de rétention. La *Figure 2* montre que chaque substrat a un comportement différent lorsqu'il est irrigué, et la notion de "propriétés hydriques" entre en jeu. Lors d'un arrosage, la porosité totale prend une place essentielle dans le stockage de l'eau

[°] cf liste des abréviations p. V

dans les micropores, mais aussi de l'air dans les macropores (Cannavo, Michel, 2013 ; Prémont, 2015 ; Kerloch, 2016). Généralement, une courbe de rétention d'eau permet de mesurer cette capacité de stockage. Elle donne des indications sur le potentiel matriciel du support, soit la tension que fournit le substrat afin de conserver l'eau (annexe I). Cela donne des indications quant à la force de succion que devra exercer la plante afin de prélever l'eau dont elle a besoin. Plus le support sera sec, plus la plante devra fournir une énergie importante (Prémont, 2015 ; Kerloch, 2016).

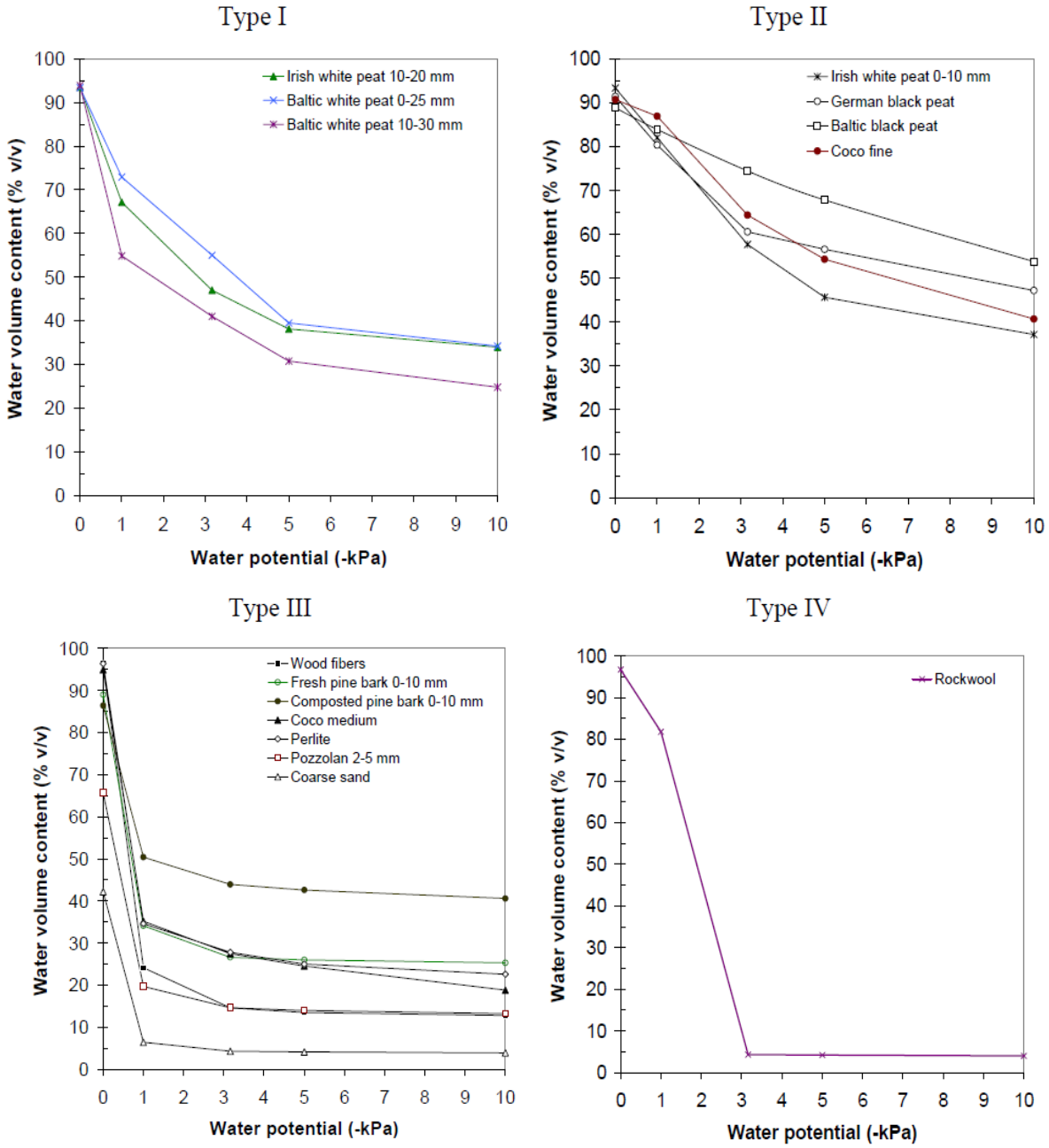


Figure 2: Exemples des types de courbes de rétention d'eau de différents matériaux utilisés comme support de culture pour le hors-sol. La production de fraises se fait essentiellement sur de l'écorce compostée, du mélange tourbe/écorce et des fibres de coco (Michel, 2010)

Ces critères donnent naissance aux notions de conductivité hydraulique et de mouillabilité. La conductivité hydraulique permet d'estimer la vitesse de circulation de l'eau, soit la vitesse de ressuyage après irrigation (Prémont, 2015). Elle est étroitement liée à la mouillabilité qui dépend des propriétés hydriques du substrat, qui peuvent varier en fonction de l'état de décomposition de ce dernier (Kerloch, 2016). La mouillabilité représente la capacité de l'eau à s'étaler sur la surface d'un matériau, et donc à imbiber celui-ci. Michel et al. (2015) ont d'ailleurs classer plusieurs

substrats par ordre croissant de leur capacité de mouillabilité : tourbe noire < écorce < tourbe blonde < produit à base de bois < coco. Il est important de préciser que cet ordre n'est effectif que sur des supports prêts à la plantation. Dès lors qu'ils entrent en culture, les cycles de séchage/réhumectation peuvent entraîner des problèmes d'hydrophobie qui modifient leurs propriétés d'origine (Michel, 2010 ; Kerloch, 2016).

De ce fait, il est nécessaire de connaître l'aptitude à la réhumectation des substrats organiques avant leur utilisation. Une irrigation qui n'est pas en adéquation avec le support, peut se traduire par une résistance à l'infiltration de l'eau, ou à la création de passages préférentiels pour l'eau et les solutés. La mouillabilité peut être testée selon deux méthodes : la mesure d'angle de contact, ou le test Hydration Efficiency (Michel, 2010 ; Kerloch, 2016 ; Coste, Michel, 2017). Selon ce test, les tourbes (blondes et noires) peuvent avoir des comportements très différents, mais plus le substrat est sec, plus il sera difficile à réhumecter. Pour ce qui est de la fibre de coco, la granulométrie influence énormément le comportement du substrat, alors que les chips ou la coco fine ne posent aucun problème d'hydratation. En revanche, la fibre de coco médium peut avoir une bonne réhumectation, mais pas les particules grossières qui la composent, ce qui pose un problème si le substrat s'est entièrement asséché. Enfin, pour ce qui est des écorces compostées, leur aptitude à la réhumectation est plus que satisfaisante. Michel (2010) et Coste, Michel (2017) ont établi une classification des substrats horticoles les plus utilisés dans les mélanges pour les sacs de cultures en fonction du risque d'hydrophobie. Cette classification comporte cinq niveaux allant de 1 à 5, 5 étant le risque le plus important d'hydrophobie. Ainsi, les chips comme la coco fine sont définies comme des substrats ne présentant aucun risque d'hydrophobie (niveau 1), l'écorce compostée présente un risque modéré d'hydrophobie, mais irréversible (niveau 4), et la tourbe blonde ainsi que la coco medium présentent un risque élevé d'hydrophobie (niveau 5).

Enfin, le comportement physique des substrats peut également être modifié par le développement racinaire des plants. Les racines ont tendance à se développer dans les interstices les plus larges, soit les macropores, et ce, jusqu'à les obstruer partiellement ou complètement. L'air circule alors beaucoup moins bien dans le substrat et la capacité de rétention en eau augmente (Cannavo et al., 2011 ; Cannavo, Michel, 2013).

Les propriétés chimiques sont moins diverses et concernent les échanges cationiques, le taux de minéralisation de la matière organique, ou encore le taux de nitrification (Raviv, Lieth, 2008). Afin d'évaluer l'aptitude d'un substrat à retenir des éléments minéraux, il est intéressant d'utiliser sa valeur de capacité d'échange cationique (CEC) (Guérineau et al., 2003 ; Prémont, 2015). Il s'agit de l'indice de capacité du support à échanger des cations en solution avec des cations absorbés ; autrement dit, il donne des informations sur la capacité d'un sol à résister au changement de pH. Les valeurs sont en général plus élevées dans les substrats organiques, dit aussi "réactifs" à cause de leur aptitude à modifier la solution de fertilisation (Maher et al., 2007 ; Prémont, 2015). La mesure de la conductivité électrique[*] (Ec) de la solution est ainsi le meilleur moyen d'évaluer la CEC[°] d'un substrat.

Pour terminer, les propriétés biologiques des substrats sont très peu mises en avant, et ne sont intéressantes que pour des supports organiques. Ils permettent le développement d'une activité biologique avec la présence de micro-organismes qui entrent dans les processus de minéralisation et d'humification. Afin de s'assurer de cette activité, il est possible de mesurer la biostabilité en évaluant le rapport C/N, ou bien le taux de respiration du substrat (Prémont, 2015). Des projets de mycorhization des sacs voient le jour et pourraient se développer dans les années à venir (CA Morbihan, 2011).

[*] cf glossaire p. IV

[°] cf liste des abréviations p. V

2.2 Matériaux

2.1.1 Tourbe

Parmi les supports organiques existants, la tourbe a été l'un des plus utilisés en Europe, et en Amérique du Nord pour la culture hors-sol depuis des années. Mais son coût autant économique qu'environnemental (destruction d'écosystèmes fragiles pour son extraction) pousse les fabricants de substrat à trouver des alternatives tout aussi intéressantes (Maher et al., 2007 ; Ameri et al., 2012). Il s'agit d'un matériau issu de la décomposition de mousses (sphaignes) et de carex dans des sols humides et acides (Guérineau et al., 2003 ; Maher et al., 2007). Ses fortes porosité et capacité de rétention d'eau sont des atouts, et proviennent des cellules végétales qui la composent. Cependant, ces atouts varient fortement en fonction du degré de décomposition de la matière du support. Pouvant devenir hydrophobe, il est impératif de bien ajuster l'irrigation afin d'éviter un tassement et l'asphyxie racinaire (Cannavo, Michel, 2013 ; Kerloch, 2016).

2.1.2 Ecorce de pin

Les écorces de pin sont le substrat le plus utilisé en France du fait de sa grande disponibilité (Cantliffe et al., 2007 ; Kerloch, 2016). Sous-produit de l'industrie du bois, elles sont en général broyées, calibrées et compostées, et sont plutôt adaptées à des cultures longues (Guérineau et al., 2003). En effet, leurs rôles d'origine en tant que protection des arbres contre la dessiccation, les attaques phytopathogènes, et leur résistance à la décomposition microbienne en font un produit intéressant pour la culture hors-sol (Kerloch, 2016). De plus, la composition des sacs peut varier en fonction des espèces de pins utilisées, de leurs conditions de croissance, ou encore de l'âge des arbres, ainsi que la granulométrie (Maher, 2007 ; Kerloch, 2016). Elles peuvent être utilisées sans compostage, à condition d'être suffisamment vieilles pour éviter le phénomène de phytotoxicité à cause des terpènes contenus dans les écorces, qui peuvent devenir des inhibiteurs de croissance pour les plantes (Maher, 2007). Enfin, en les compostant, il est possible d'arriver à une CEC[°] équivalente à celle de la tourbe (Kerloch, 2016).

2.1.3 Fibres de coco

De plus en plus utilisée pour la culture hors-sol, la fibre de coco présente des caractéristiques intéressantes pour ce mode de culture. Elle est reconnue pour être un support de culture à faible coût, avec une bonne capacité de rétention d'eau et d'air (Cantliffe, 2007 ; Ameri, 2012). Il s'agit d'un matériau léger et plus facile à mettre en place que ceux évoqués précédemment, bien qu'il faille prendre certaines précautions avant son utilisation. Son origine en fait un matériau riche en sodium, chlorure, et potassium, qui peuvent être néfastes pour la culture. Il est donc indispensable de bien rincer, casser et fertiliser les sacs avant leur installation. A noter que son volume peut être multiplié par neuf pendant la phase de réhydratation (Guérineau et al., 2003 ; Maher, 2007 ; Kerloch, 2016). A ce jour, encore peu de rapports et d'études attestent de son efficacité sur le rendement de production de fraisiers (Cantliffe, 2007)

[°] cf liste des abréviations p. V

3. Eléments nutritifs

3.1 Rôle des éléments nutritifs

Comme pour tout amendement, les éléments nutritifs peuvent être classés en deux grandes catégories : les macro-éléments (azote, potassium, phosphore, calcium, magnésium et soufre) et les micro-éléments (cuivre, fer, zinc, molybdène, manganèse et bore). Tous ont des fonctions spécifiques dans le développement des plants de fraisiers à plus ou moins grande échelle.

Dans les macro-éléments, l'azote est certainement le plus important et le plus étudié. Avec l'eau, il constitue le facteur clé de la croissance des plantes en intervenant comme composant principal des acides aminés. Il peut être absorbé sous ses deux formes ioniques NO3- et NH4+, mais il est important de vérifier le stade de développement des plants avant de favoriser l'une ou l'autre (Parent, 2001 ; Guérineau et al., 2003 ; Sarraf, 2011). En effet, la forme ammoniacale n'est intéressante qu'au début de la phase de croissance, car la plante à tendance à en absorber à l'excès, pouvant aller jusqu'à l'observation de brûlures des fleurs. En revanche, la forme nitrique (nitrate ou nitrite) est à apporter en quantité suffisante, de la floraison à la fin de la période de récolte (Sarraf, 2011). Une carence se manifesterait par une réduction de la biomasse (feuilles et stolons), alors qu'un excès augmenterait la masse foliaire, diminuerait la résistance au gel et au champignon *Botrytis cinerea*, et serait à l'origine d'une augmentation de l'acidité des fruits (Parent, 2001 ; Guérineau et al., 2003 ; Sarraf, 2011). Les résultats pessimistes dûs à l'excès d'azote pourraient être expliqués par un problème de réduction et d'assimilation de la forme NO3- (Cantliffe et al., 2007). Darnell, Stutte (2001) suggèrent que l'augmentation de rendement ou de croissance des fruits n'est pas limité par la disponibilité en N, mais par la capacité des plantes à le réduire et l'assimiler sous forme NO3- dans leurs tissus ; ce qui se traduit par un manque de réducteurs NADH° ou NADPH°. Toutes les études sont caractéristiques d'un cultivar ou de conditions environnementales particulières, mais globalement, un surplus d'azote dans les solutions n'aurait aucun intérêt pour le rendement commercial, ce qui implique que les quantités pourraient être mieux adaptées.

Le potassium est le deuxième élément le plus important puisqu'il entre dans le processus de formation des fruits. Il intervient dans les mécanismes de la photosynthèse, de formation des protéines et de l'activité enzymatique (Parent, 2001 ; Guérineau et al., 2003 ; Sarraf, 2011). Le potassium assure également un rôle très important dans le transport de l'eau et des nutriments vers les organes puits, et permet aux plantes de mieux résister au stress hydrique (Parent, 2001 ; Vago et al., 2008). Une carence réduira la surface foliaire, alors qu'un excès limitera l'absorption d'autres éléments comme le calcium et le magnésium. Les fruits seront alors plus acides et moins aptes à la conservation (Guérineau et al., 2003 ; Vago et al., 2008 ; Sarraf, 2011)

Bien qu'étant un constituant essentiel des engrais, le phosphore ne prend que la troisième place avec son rôle dans la constitution des acides nucléiques, et dans les processus énergétiques (Guérineau et al., 2003). Il s'agit d'un élément très mobile et présent en grande quantité dans les fruits. Sa carence entraîne l'inhibition de la prolifération des cœurs, soit une baisse de rendement Son rôle se rapproche de celui du calcium dont le rôle est de construire le squelette du fraisier (Sarraf, 2011).

Le calcium est le principal constituant des acides pectiques, d'où son rôle dans le maintien de la rigidité des tissus. Il facilite les réactions de défense des plantes face à des stress, mais est peu mobile dans la plante (Sarraf, 2011). Sa demande pour couvrir tous les organes est donc importante sur toute la phase de croissance, puis elle est particulièrement élevée pendant la phase de production. Si ce calcium n'est pas apporté en quantité suffisante, les fruits seront plus sensibles

° cf liste des abréviations p. V

aux attaques et à la conservation ; dans le cas contraire, l'acidité des fruits et leur nombre seront diminués (Parent, 2001).

Dans les derniers macro-éléments, le magnésium assure l'activité photosynthétique en jouant le rôle d'activateur d'enzymes, et le soufre la formation des protéines. De ce fait, leur carence provoquerait inévitablement une baisse de rendement (Sarraf, 2011).

Enfin, les micro-éléments assurent des fonctions tout aussi importantes, mais beaucoup plus spécifiques. Le cuivre permet la stabilité de la chlorophylle, le fer joue un rôle dans plusieurs activités métaboliques, le zinc assure la synthèse des régulateurs de croissance, le molybdène participe au métabolisme de l'azote, le manganèse entre dans la réduction des nitrates et l'activité photosynthétique, et le bore contribue au métabolisme de l'auxine, à la germination du pollen, ainsi qu'au transfert des glucides (Guérineau et al., 2003).

3.2 Solutions nutritives

Pour adapter au mieux la fertilisation des plants de fraisier, il est important de dissocier leurs deux phases de développement auxquelles correspondent des besoins particuliers. La phase végétative (sortie de dormance) correspond à la période où le fraisier procède au développement de sa masse foliaire et à l'induction florale. Comme dit précédemment, la forme ammoniacale est intéressante uniquement à cette période pour stimuler la croissance du plant, et obtenir un plant vigoureux à plusieurs cœurs (Sarraf, 2011). Comme le présente le tableau 2 sur la deuxième phase qui regroupe la floraison et la fructification, l'équilibre est différent pour tous les éléments. La logique veut que tous les équilibres soient préparés à partir de la concentration voulue en azote. Celle-ci est en général conseillée à 8/9 meq/l pendant la période végétative, et peut être diminuée jusqu'à 5 meq/l en période de fructification, à condition d'irriguer avec la solution fertilisante sur la totalité de la journée (Raynal Lacroix, 2012)

Tableau 2 : préconisations d'un équilibre de la solution nutritive en meq/l établies par Raynal Lacroix (2012) et Izard et al. (2010) pour des variétés remontantes.

Stade	Ec	NO_3^-	NH_4^+	$H_2PO_4^-$	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K/(Ca+Mg)
Développement végétatif	1,0	6,4	1,6	1,1	3,1	3,6	1,2	0,65
Floraison – Fructification	0,7	5	0	0,7	2,8	3	0,7	0,75

Globalement, la concentration en éléments minéraux d'une solution doit être calculée en tenant compte du climat, du substrat utilisé, du stade de la plante et de sa variété (Coquelet et al., 2003 ; Lieten, 2013). Néanmoins, certains équilibres sont plus impactants que d'autres sur la qualité des fruits. Un déséquilibre de K/Ca ou K/Ca+Mg affecte l'acidité des fruits, leur brillance, et les rend plus fragiles à la récolte. Cela peut aussi entraîner une perte de rendement sur la deuxième phase de production pour les variétés remontantes (Sarraf, 2011 ; Guérineau et al., 2003).

4. Irrigation

Comme son nom l'indique, la production hors-sol s'est affranchie du support de culture originel, et s'est ainsi rendue dépendante de nombreuses interventions. L'eau et les minéraux sont les éléments essentiels au bon développement des plantes, c'est pourquoi il est indispensable de savoir les apporter en quantité suffisante et aux moments opportuns. Pour cela, le comportement des plantes vis-à-vis de l'eau mérite une attention toute particulière, avant de se pencher sur ce qui est appelé "irrigation de précision".

4.1 L'eau et la plante

Les processus d'absorption de l'eau par les plantes sont connus et communs à quasiment toutes les espèces végétales. En effet, l'eau est absorbée par la plante par l'intermédiaire des racines et des poils absorbants qui les recouvrent. Ce processus est rendu possible grâce à la différence de potentiel hydrique (Ψ) entre le sol et la plante (Ψplante < Ψsol). Le potentiel observé dans les racines est lié à la force de succion exercée par la pression osmotique des vacuoles des cellules, et au potentiel de turgescence. Celui du sol est dû à diverses activités physiques, chimiques et biologiques ; et lorsqu'il dépasse 16 bars, la plante ne peut plus absorber le peu d'eau qu'il contient dans ses pores : on parle alors du point de flétrissement (Zaid, 2014 ; Prémont, 2015). Le transport de l'eau à travers la plante serait impossible sans le phénomène de transpiration, moteur de la montée de sève et des échanges gazeux. Les stomates sont le siège de cette activité ; leurs mouvements d'ouverture/fermeture sont contrôlés par la présence de l'élément K^+ responsable du phénomène de turgescence cellulaire (Blanke, Cooke, 2004 ; Zaid, 2014)

Les stomates sont ainsi les premiers à répondre physiologiquement à un stress hydrique. Leur fermeture agit comme une protection à une trop forte perte d'eau, mais réduit également l'absorption de CO2 nécessaire aux différentes activités métaboliques de la plante (Chaves et al., 2003 ; Orsini et al., 2012). Cependant, toutes les espèces et variétés ont des tolérances au stress différentes, ce qui leur permet de s'adapter plus ou moins rapidement. Certaines espèces vont jusqu'à réduire leur consommation d'eau lorsque la ressource est faiblement disponible, ce qui implique des changements d'ordre physiologique et biochimique (Klamkowski, Treder, 2008 ; Grant et al., 2010).

En effet, toutes les variétés de fraisier possèdent des différences dans la physiologie de leurs feuilles, et dans les échanges biochimiques au niveau des fruits, des feuilles et des racines (Martínez-Ferri et al., 2016). Avec ces disparités, l'étude de l'efficience de l'eau (WUE) devient intéressante pour comprendre comment chaque variété utilise l'eau qui lui est attribuée. Il a d'ailleurs été montré qu'une forte WUE° n'était pas forcément signe d'un meilleur rendement puisqu'elle prend en compte l'efficacité de la transpiration et l'indice de récolte : témoins d'un nombre de fruits produits et non de leur poids (Klamkowski, Treder, 2008 ; García Morillo et al., 2015 ; Martínez-Ferri et al., 2016).

Plus globalement, les plants produits en condition hors-sol sont souvent exposés à des risques de stress hydrique, étant donné le faible volume de réserve contenu dans les sacs (Klamkowski, 2008). Or, les fraisiers ont de forts besoins en eau du fait de leur système racinaire superficiel et essentiellement chevelu, de leur importante surface foliaire, ainsi que de la forte teneur en eau des fruits (Martinez, 2016 ; Bergeron, 2010). Il a été montré qu'un plant absorbait en moyenne journalière l'équivalent de sa masse en volume d'eau (Khouni, 2009). De plus, il s'agit d'une plante développant des stolons qui, après les fruits, sont les principaux organes puits pour le plant mère. Ils émettent jusqu'à trois plants filles qui représentent entre 60 et 300 g de

° cf liste des abréviations p. V

matière fraîche et 200 ml d'eau. Il s'agit d'organes possédant peu de stomates par rapport aux feuilles et dont la capacité d'adaptation à un manque d'eau est relativement faible (Blanke, 2004 ; Orsini, 2012). Étant une forme de reproduction, le fraisier se trouve dans l'obligation de leur fournir de l'eau.

4.2 Bilan hydrique et tensiométrie

Pour comprendre réellement comment les besoins du plant de fraisier évoluent, une estimation du bilan hydrique semble être la solution la plus accessible. Il s'appuie sur les informations liées à l'offre en eau (réserve utile), à la demande par la culture (conditions climatiques, évapotranspiration et coefficient culturaux), aux apports (irrigation) et aux pertes (drainage) (Barret et al., 2018). Le bilan s'écrit ainsi :

$$\Delta RU = I - (ETM - D)$$

Avec ΔRU (mm), la variation de réserve utile entre 2 dates, I (mm) l'irrigation, ETM (mm) l'évapotranspiration maximale, et D (mm) le drainage.

L'évapotranspiration maximale (ETM) correspond à l'évapotranspiration d'une espèce en conditions hydriques non limitantes :

$$(1)\ ETM = ET_0 * Kc$$

Avec ETM (mm), ET_0 (mm) est l'évapotranspiration potentielle, et Kc le coefficient cultural

L'ET_0 est couramment calculée à partir de l'équation de Penman-Monteith, qui tous les paramètres qui concernent les échanges d'énergie correspondant à l'évapotranspiration (ET_0) (Jolliet, Bailey, 1992 ; Allen et al., 1998) :

$$(2)\ ET_0 = \frac{\Delta(Rn-G)+\rho aCp\,(\delta e)ga}{\left(\Delta+\gamma\left(1+\frac{ga}{gs}\right)\right)Lv}$$

Δ = taux de variation de l'humidité spécifique
R_n = irradiance nette (W/m²)
G = flux de chaleur du sol (W/m²)
ρ_a = densité de l'air à pression constante (kg/m^3)
C_p = capacité thermique spécifique de l'air (J/kg/K)
δ_e = humidité spécifique (Pa)
g_a = conductance atmosphérique (m/s)
g_s =conductance de surface (m/s)
γ = constante psychrométrique
L_v = chaleur latente volumétrique de vaporisation (MJ/m^3)

L'ET_0[°] est donc modifiée par des facteurs abiotiques, mais également des facteurs biotiques que l'on retrouve, en partie grâce aux coefficients culturaux propres à chaque culture (Anderson, 2016). La difficulté de la méthode de calcul du bilan hydrique reste que les résultats ne prennent pas forcément en compte tous les facteurs culturaux et environnementaux. C'est pour cela qu'il est intéressant de procéder à un suivi de la culture par le biais de l'état hydrique du sol, mesuré à l'aide de tensiomètres (Bergeron, 2005 ; Pardossi et al., 2011 ; Shock, 2011 ; Lemay et al., 2012 ; Anderson, 2016). Les informations qu'ils apportent sur le potentiel matriciel d'un sol ont ainsi permis de déterminer des seuils d'irrigation pour un rendement optimal (Anderson, 2016).

[°] cf liste des abréviations p. V

La disponibilité en eau dépend du type de support utilisé, et comme vu précédemment, elle s'estime au moyen de courbes de rétention. La température impacte la transpiration du plant en influençant l'humidité relative de l'air dans les structures. Il a été montré qu'une humidité relative élevée réduit la croissance des plants en diminuant la capacité d'absorption des nutriments. Les éléments les plus touchés sont les macro éléments N, K et Ca. De plus, une diminution de la croissance favorise une diminution de la surface foliaire, donc moins d'activité photosynthétique d'où découle, à terme, une perte de rendement pour la production, comme cela a été mis en évidence sur la tomate (Gisleröd et al., 1987 ; Jolliet, Bailey, 1992). Il a également été démontré que les nouveaux matériaux de construction des serres, en passant du simple aux doubles parois, causait la perte de 15% de l'énergie lumineuse, mais l'augmentation de 10% de l'humidité de l'air (Gisleröd et al., 1987). Il est évidemment indispensable de corréler ces indications à des données climatiques, ainsi qu'aux mouvements d'air internes aux installations. En effet, ceux-ci peuvent être la cause d'une forte déshumidification de l'air, qui inversement fera augmenter la transpiration foliaire et le risque pour la plante de se trouver en déficit hydrique (Jolliet, Bailey, 1992).

4.3 Irrigation de précision

Une irrigation de précision vise à évaluer précisément les quantités d'eau requises d'une culture, et le moment précis de son application en combinaison avec un système hydraulique efficace, et une distribution uniforme de l'eau (Smith et al. 2010). Les besoins totaux du fraisier sur la saison de production avoisinent 300 à 400 mm/plant sous climat humide, et 600 à 850 mm/plant sous climat sec, soit 7 à 21 l/plant en culture de pleine terre. En prenant en compte la réserve utile que peut avoir un sol, il est facile d'imaginer des besoins supérieurs en conditions hors-sol (Netafim, 2012 ; García Morillo et al., 2015).

L'intérêt de la micro-irrigation prend alors tout son sens, puisqu'elle permet d'apporter une humidité optimale uniquement dans la zone racinaire du plant (Anderson, 2016). Cependant, il est nécessaire de bien la maîtriser (apports fréquents mais peu conséquents) afin de couvrir les besoins, sans tomber dans l'excès et risquer des pertes racinaires, un gaspillage de la ressource, ou encore un lessivage des éléments (Bergeron, 2005 ; 2010). Il faut également prendre en compte l'évolution du système racinaire dans la zone irriguée au cours de la culture, et vérifier le potentiel hydrique du substrat qui peut varier en fonction du développement du plant et de sa variété (Bergeron, 2010 ; Shock, 2011 ; Lemay et al., 2012). Le seuil optimal a été fixé à environ -15 kilopascal (kPa), malgré un manque de données, considérant que le substrat n'avait pas encore subi de dommage irréversible, et qu'il avait perdu 50 % de l'eau disponible pour la plante (Anderson, 2016 ; Bergeron, 2010 ; 2005). Ce seuil s'accompagne des quatre phases d'irrigation des substrats : ré-humectation, active, ressuyage, nocturne, qui permettent de mieux adapter les apports et leur quantité (Hortitecnews, 2017).

Bien que les besoins varient aussi en fonction de la variété, du stade végétatif et des conditions climatiques, il est préconisé d'apporter environ 150 ml/goutteur, soit environ 15 ml/plant à chaque arrosage. Cela correspond à des tours de 4 à 5 min avec des goutteurs délivrant 2 l/h (Coquelet, 2003). Etant donné que la culture hors-sol nécessite une pente pour faciliter l'écoulement des eaux de drainage d'au moins 5/1000, ces valeurs ont été choisies pour s'assurer qu'un volume suffisant arrive en bout de rang (Izard et al., 2010). Il en va de même pour les valeurs de drainage comprises dans l'idéal entre 10 et 20 %, mais pouvant être diminuées jusqu'à 5 à 10 % selon les conditions (Coquelet, 2003). Les arrosages sont en général espacés d'une à deux heures en période chaude, mais peuvent être séparés d'une journée entière, voire plus, en début de culture, et quand les conditions climatiques le permettent (Prémont, 2015).

5. Fertirrigation

5.1 Composants et fonctionnement du système

Le système de fertirrigation doit être en adéquation avec les besoins directs de la plante. Le procédé d'automatisation a d'abord été élaboré au Pays Bas et en Belgique sur des cultures hors-sol plus fragiles et demandeuses que la fraise (Lieten, 2013). Un ordinateur contrôle à distance le système composé d'une dizaine d'éléments (*Figure 3)* :

- Un ou plusieurs réservoirs d'eau filtrée et mise sous pression (elle peut également être désinfectée lorsqu'il s'agit d'un recyclage d'eau de drainage)
- Des bacs dans lesquels sont préparés les solutions mères
- Une machine de dosage pour l'injection des solutions et l'ajustement du pH
- Des sondes pour contrôler le pH et la conductivité (Ec) dans les bacs
- Un ou plusieurs compteurs d'eau pour contrôler les injections
- Des composants hydrauliques permettant l'acheminement de l'eau jusqu'aux cultures (pompes, vannes, goutteurs, tuyaux…) (Pardossi et al., 2011 ; Raviv, Lieth, 2008)
- Un système de filtrage et recyclage des effluents (radiations UV et filtre à sable) lorsque le système fonctionne en circuit fermé (Lieten, 2013)

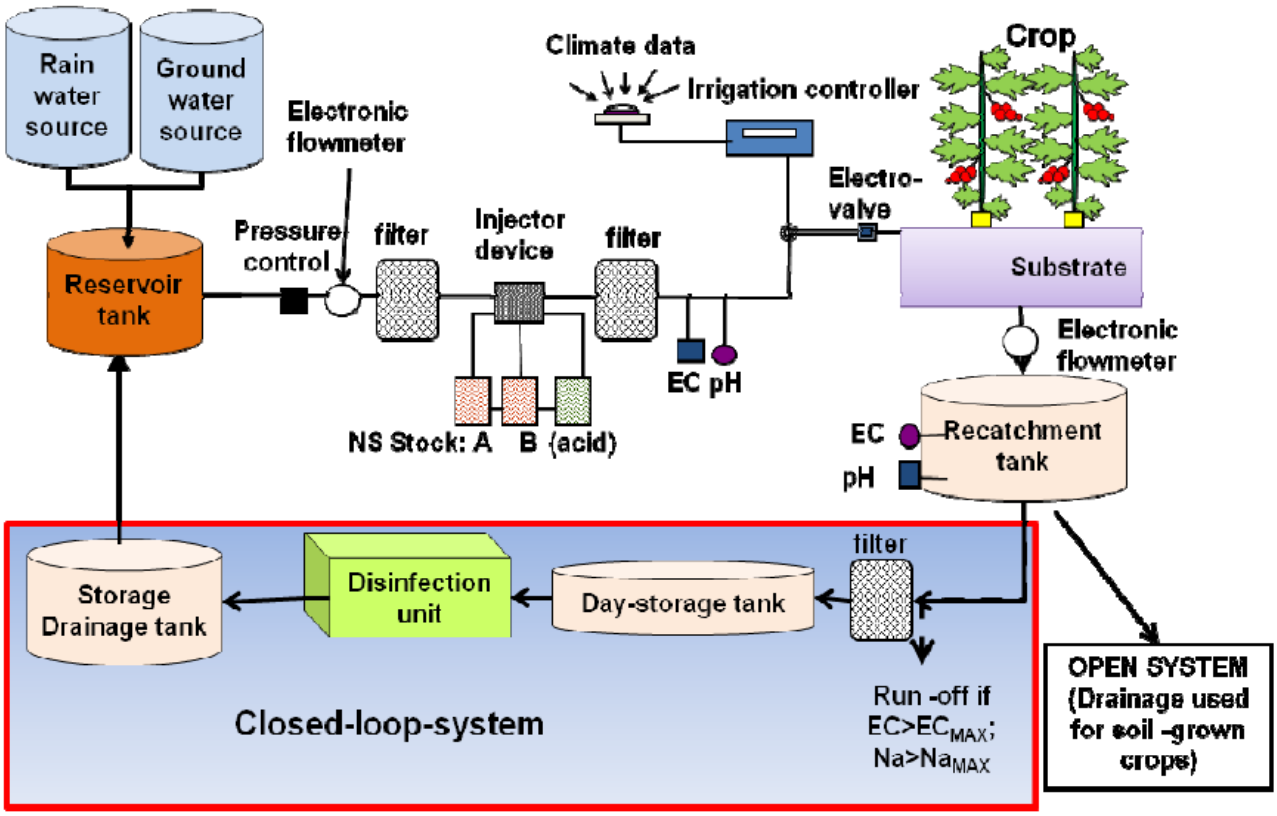


Figure 3 : schéma d'une installation type pour une production hors-sol en circuit ouvert ou fermé (Pardossi et al., 2011)

Il s'agit d'une méthode d'irrigation plus coûteuse que la fertilisation classique à cause des frais liés au matériel d'installation et aux engrais solubles (Odet et al., 1989). La quantité de ces engrais doit être adaptée à la composition de l'eau de départ, et leur répartition dans les bacs, selon leur risque d'interactions (précipitations de certains éléments en présence de sulfates). La solution mère ne doit pas excéder une concentration de 10 kg d'engrais pour 100 l d'eau, c'est pourquoi il

est important de connaître les équivalences des éléments présentés dans le tableau 3 (Odet et al., 1989).

Tableau 3 : correspondance entre un milliéquivalent (meq) et une masse d'ion ou d'élément minéral (mg) (Odet et al., 1989)

Milliéquivalents	en milligrammes d'ions	en milligrammes d'éléments
1 meq NH_4^+	18 mg NH_4^+	14 mg N
1 meq NO_3^-	62 mg NO_3^-	14 mg N
1 meq $H_2PO_4^-$	97 mg $H_2PO_4^-$	71 mg P_2O_5
1 meq HPO_4^{2-}	48 mg HPO_4^{2-}	35,5 mg P_2O_5
1 meq SO_4^{2-}	48 mg SO_4^{2-}	16 mg S
1 meq K^+	39 mg K^+	47 mg K_2O
1 meq Ca^{2+}	20 mg Ca^{2+}	28 mg CaO
1 meq Mg^{2+}	12 mg Mg^{2+}	20 mg MgO

Le suivi de la culture doit être précis et doit tenir compte de l'ETP°, du transport, de l'absorption de l'eau et des ions, de la répartition des ions entre la solution et le support de culture, de la croissance et de l'extension des racines (Raviv, Lieth, 2008). Tous ces éléments sont surveillés en relevant régulièrement l'Ec de la solution et l'Ec dans les eaux de drainage. Lorsque l'écart entre les deux dépasse les 0,3 mS/cm pendant plusieurs jours, il est conseillé d'ajuster la quantité de solution mère injectée, voire de changer complètement son équilibre (Odet et al., 1989 ; Coquelet et al., 2003 ; Raynal Lacroix, 2012)

5.2 Salinité et conductivité

Fragaria x ananassa Duch. est considérée comme une espèce sensible à la salinité du sol. Or celle-ci est directement liée à la conductivité par la relation établie par Hoffman, Shannon (2007)(coefficient de 640). Considérée comme le facteur abiotique majeur pouvant causer une perte de rendement, la salinité d'un sol ou d'un substrat est entraînée par la concentration en ions dans la solution du sol (Na, Ca, Mg, K…) (D'Anna et al., 2003 ; Yildirim et al., 2009). Elle est à l'origine de la tension osmotique qui, lorsqu'elle augmente, empêche la plante de prélever l'eau de son support de culture. Une forte salinité crée ainsi des désordres physiologiques et biochimiques en modifiant plus particulièrement l'absorption et le transport de Ca (D'Anna et al., 2003 ; Pirlak, Eşitken, 2004 ; Sarraf, 2011 ; Prémont, 2015). Il en découle une perte de rendement dès lors que le seuil de 1,2 mS/cm est dépassé sur la période de fructification, mais peut être compensée par une amélioration de la concentration en sucre et de la fermeté des fruits (Tanji, Kielen, 2002 ; D'Anna et al., 2003 ; Coquelet et al., 2003).

Ainsi, il peut être intéressant de jouer sur des valeurs de conductivité permettant un meilleur rendement commercial et/ou une meilleure qualité des fruits. Une faible Ec pendant la phase végétative permet de mieux contrôler la croissance des plants, et ainsi de pouvoir contrôler la période de production, et de mise en marché (Sarraf, 2011). Le meilleur rendement commercialisable en hors-sol a été observé avec une Ec de 0,9 mS/cm, mais le nombre de fruit par plant augmente dès 0,7 mS/cm. Il a également été montré qu'une faible conductivité réduisait l'acidité des fruits (Nestby et al., 2004). Bien que les études reliant l'effet de la salinité du sol sur la qualité des fruits soient peu nombreuses, toutes montrent qu'un certain volume (en fonction de la résistance de la variété) peut être bénéfique pour la production (Prémont, 2015).

° cf liste des abréviations p. V

Chapitre 2 : Matériel et Méthode

Cette étude prend place sur le bassin versant du Caudeau Louyre, affluents de la Dordogne considéré déficitaire en eau par l'Agence de l'Eau qui finance le projet. En effet, le bassin se situe sur une des zones climatiques du département de la Dordogne comptant un nombre de jours moyen où les pluies excèdent 20 mm inférieur à dix depuis 1980. Ce statut apporte ainsi de véritables enjeux quant à la réduction et/ou à l'optimisation de l'utilisation de la ressource en eau dans cette zone. Quatre parcelles sont équipées d'un système complet (pluviomètres et conductimètres), et servent de parcelles de référence depuis deux ans.

1. Matériel de production



Figure 4 : photographies des installations des quatre parcelles prises le 15/05/2018 dans le Val de Caudeau Louyre (24) (Zerbino, 2018)

Les quatre parcelles de référence ont des caractéristiques différentes, tant au sujet de l'installation que des variétés (*Figure 4)* ou encore des substrats. Toutes les mesures sont effectuées sur une longueur de 5 m, au début d'un rang (point le plus haut) situé en milieu de parcelle. Les différences entre les parcelles qui pourraient avoir une influence sur les résultats de cette étude sont résumées dans le tableau 4.

Tableau 4 : descriptif des quatre parcelles et de leurs équipements

	n° parcelle	1	2	3	4
SYSTÈME	installation	multichapelle	tunnel	multichapelle	tunnel
	couverture	double paroi	plastique	simple paroi	plastique
	longueur	45m	30m	60m	36m
	sol	bâche	sol nu	bâche	sol nu/enherbé
	gouttières	suspendues	piquets	suspendues	piquets
	nb de pics/sac	4	4	3	4
	débit goutteur	5l/h	8l/h	8l/h	8l/h
SUPPORT	substrat	fibre de coco	écorce pin compostée	écorce pin compostée	Tourbe 40% / Ecorce 60%
	longueur sac	1m	1m	1m	1m
	volume sac	20 litres	24 litres	28 litres	20 litres
	année de prod°	2ème	2ème	2ème	2ème
CULTURE	variété	Murano	Murano	Mara des Bois	Charlotte
	production	précoce /saison	remontante	remontante	remontante
	type de plant	mini tray*	mini tray	trayplant*	trayplant
	nb plant/sac	12	10	9	9
FERTILISATION	origine eau	forage	forage	lac sur réseau irrigation	forage
	consigne Ec	1,5 mS/cm	1,2 mS/cm	1,2 mS/cm	1,5 mS/cm
	fréquence	7/jour	9/jour	7/jour	7/jour
	durée	5min	4min	4min	3min
	pilotage	prog horaire	prog horaire	solarimètre	prog horaire

Le choix des variétés s'est fait en fonction de ce qui se produit sur le bassin, ou sur le département. Les trois variétés sont dites remontantes et produisent de mai jusqu'aux premières gelées.

- La variété **Mara des Bois** est le croisement de (Hummi Gento x Ostara) x (Redgauntlet x Korona). C'est une variété remontante de fraisier à calibre moyen, productive et renommée pour sa qualité gustative (goût de fraises des bois). Cependant, les plants sont sensibles à l'oïdium et montrent une chute de calibre, et des fruits à la forme variable au fur et à mesure de la saison (CTIFL Balandran, 2017 ; Meilland Richardier, 2018).

- La variété **Charlotte** est le croisement de Mara des Bois x Cal 19. C'est une variété remontante à gros fruits de très bonne conservation. Elle a un bon potentiel de rendement et une qualité gustative renommée. La forme des fruits et la jutosité varient en fonction du créneau de production (Degrav'agri, 2012 ; CTIFL Balandran, 2017 ; Meilland Richardier, 2018).

- La variété **Murano** a été obtenue grâce aux programmes d'amélioration génétique du CIV (Centro Innovazione Varietale). Il s'agit d'une variété avec un potentiel de rendement important, un développement végétatif moyen, une bonne qualité gustative et une bonne tenue en conservation. Ses besoins en froid sont moyens aux alentours de 800 heures.

Malheureusement, les références sont encore peu nombreuses ; elle est de plus en plus sensible au thrips, et les fruits perdent de leur homogénéité selon la date de récolte (Degrav'agri, 2012 ; CTIFL Balandran, 2017 ; APREL, 2017).

Les substrats ont été choisis par les producteurs, et les sacs sont tous sur leur deuxième année de production. Chaque sac a déjà subi une année d'arrosage, et reste potentiellement moins homogène qu'à l'achat.

- Le substrat à base d'**écorce** est composé de 80% d'écorce de pin compostée, et de 20% de fibre de bois. Il possède une petite granulométrie (0/10) permettant une très bonne capacité de rétention d'eau (600 ml/l). Il s'agit d'un substrat fertilisé avant installation, dont le pH est maintenu à 5,5 et la conductivité (Ec) à 0,3 mS/cm pour un confort optimal des plants à l'installation (Ancay, 2010 ; Aquiland, 2016).

- Le substrat à base de **fibres de coco** est composé de fibres et de particules courtes permettant à l'air et à l'eau de bien s'infiltrer. Après arrosage, l'air occupe 24% du volume du sac et l'eau 71% ; les 5% restants, par les fibres de coco. Sa capacité de rétention d'eau est d'environ 530 ml/l, son pH à l'installation peut atteindre 7,3 et son Ec 3,4 mS/cm. Il est préférable de procéder à un rinçage lors de l'installation (Ancay, 2010).

- Le substrat à base de **tourbe** et d'**écorce** est un mélange pouvant se faire en différentes proportions. En général, il est composé de 40 % de tourbe et 60 % d'écorces compostées, mais les propriétés des deux matériaux ne s'additionnent pas. Il est cependant un substrat au pH relativement acide (~ 5), avec une bonne capacité de rétention en eau (600 ml/l) et une bonne aération. Son Ec est proche de celle de l'écorce seule, soit environ 0,3 mS/cm (Ancay, 2010 ; Hortidact, 2012).

2. Matériel de mesure

Depuis deux ans, chaque parcelle de référence est équipée d'un système de télétransmission avec un concentrateur de données de proximité, développé en partenariat avec l'entreprise Connecting Nature, spécialisée dans l'acquisition, la gestion et le traitement de données environnementales. L'outil permet la capitalisation des informations, et leur mise à disposition pour l'exploitant et les conseillers, sur place, mais également à distance. Cette station fixe relève des mesures de conductivité (Ec), de quantité d'eau à l'apport et au drainage, ainsi que de conductivité dans la solution du sac (*Figure 5).* Tous les éléments qui composent le système sont également fournis par Connecting Nature, pour être programmé directement sur le logiciel d'exploitation de données.

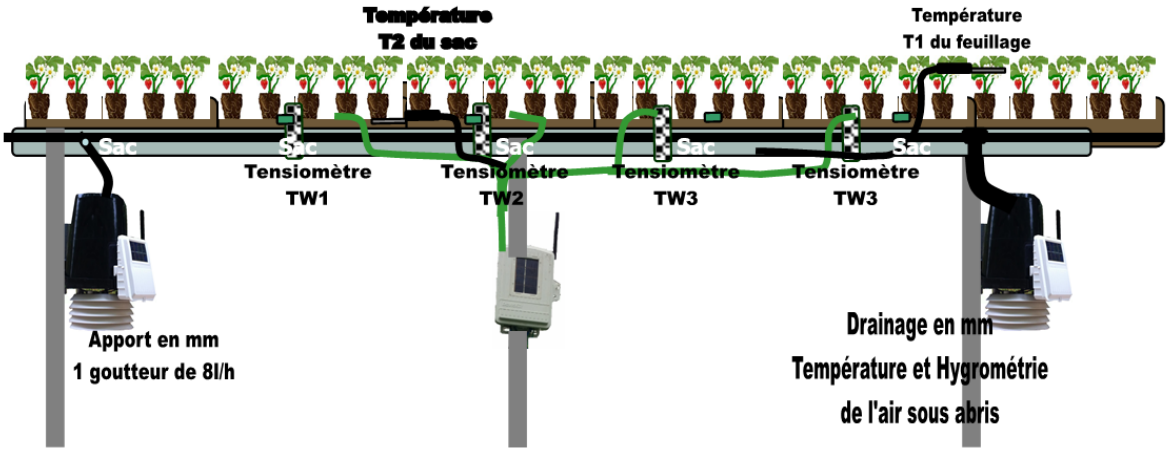


Figure 5 : Schéma de la station de récupération de données sur la parcelle 3 ; les parcelles 1, 2 et 4 ne possèdent pas de tensiomètres, mais ont le même type d'installation (document interne, 2017)

Ce système est composé d'un pluviomètre dans lequel se déverse l'équivalent d'un goutteur à chaque arrosage, et d'un deuxième pluviomètre permettant de mesurer le drainage total des 5 m étudiés (comptant 4 ou 5 goutteurs). Ils contiennent tous les deux un auget (une "cuillère") qui bascule à chaque fois que son volume atteint 0,2 mm soit un volume de 5 ml. Il s'agit d'un pluviomètre de la marque ADCON Telemetry considéré comme l'un des indicateurs de précipitation les plus précis et les plus fiables du marché. La partie récupérant l'eau est composé d'un filtre qu'il est nécessaire de nettoyer régulièrement, afin d'éviter des débordements et une mauvaise comptabilisation des volumes d'eau.

Les deux sondes capacitives mesurant la conductivité à l'apport et au drainage sont placées dans des siphons, positionnés en amont des pluviomètres. La sonde mesurant la conductivité dans le sac est enfoncée d'environ 5 cm dans le substrat au centre du sac. Toutes les valeurs mesurées par ces trois sondes sont des voltages (V).

L'ensemble de ce système (*Figure 6*) est relié à une valise permettant de relever les données en temps réel avec des intervalles de mesure de dix minutes. Ces données sont ensuite visibles grâce à un logiciel de pilotage créé pour cette installation. Celui-ci

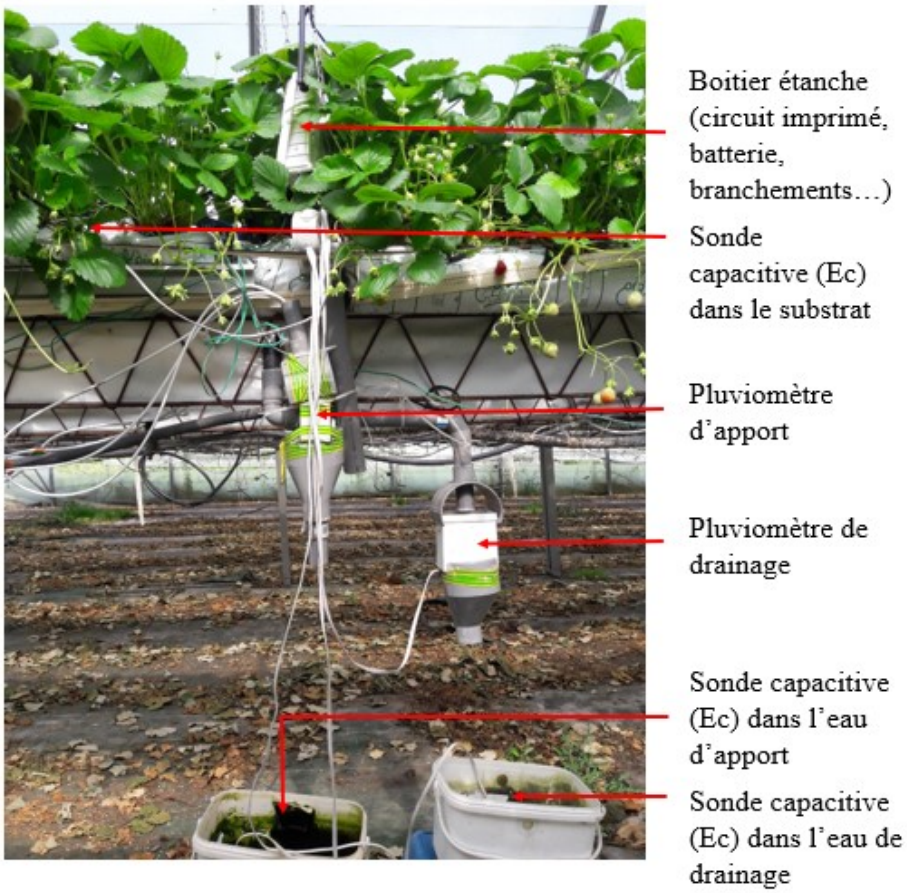


Figure 6 : vue de l'outil récupérateur de données installé sur la parcelle 3 avec les deux sondes capacitives dans des seaux. Les autres parcelles sont équipées avec des syphons permettant aux sondes de toujours être en contact avec l'eau (photographie prise le 15/05/2018 dans le Val de Caudeau Louyre, par Léa Zerbino)

indique l'apport mesuré, le drainage mesuré, le pourcentage de drainage avant midi, le pourcentage de drainage sur la journée, l'Ec à l'apport (Ec_{app}), l'Ec au drainage (Ec_{dr}), l'Ec du sac (Ec_s), la température et l'humidité de la serre, et enfin l'humidité du sac (qui n'est pas exploitable pour l'instant).

Les sondes capacitives sont des capteurs de conductivité électrique, qui se trouvent sous le nom de DFRobot Gravity en Australie. A l'origine étudiées pour être positionnées dans le sol, le risque d'oxydation pour des sondes complètement immergées peut apparaître rapidement et fausser les mesures.

En ce qui concerne les relevés mobiles, les mesures sont faites avec un conductimètre/pHmètre portatif, et un conductimètre enregistreur. L'appareil portatif de la marque Hanna est utilisé pour valider les valeurs relevées par les sondes fixes dans les eaux d'apport et de drainage. Les mesures sont faites au moins deux fois par semaine. Le conductimètre enregistreur développé par l'entreprise PADULA, a la même fonction, mais est installé dans le substrat. Il est placé perpendiculairement à l'axe du sac jusqu'à une profondeur de 8 cm (environ milieu du substrat), au centre du sac, et entre les plants afin de limiter les perturbations liées à l'activité du système racinaire. Cette sonde enregistre une valeur toutes les dix minutes, et ne doit pas être déplacée dans le sac pendant un minimum de deux semaines par parcelle, afin de collecter suffisamment de données sous différentes conditions.

3. Méthode d'analyse

3.1 Récupération et traitement de données

L'installation de pluviomètres a pour but de quantifier l'eau drainée (Vol dr) par rapport à l'eau apportée (Vol app) en millilitres. Cette information donne une indication sur les économies réelles en eau et en fertilisants qu'il est possible de faire pour chaque fraisiculteur en calculant notamment, la consommation réelle (Vol cons) des plants. Le volume drainé représente un surplus non utilisé par les plantes, donc une quantité d'eau perdue. Un seuil maximal a été fixé à un volume d'eau de drainage équivalent à 20% du volume d'eau apportée selon les recommandations du CTIFL°. Cette valeur représente le pourcentage de perte tolérable, et assure à toute la parcelle une quantité d'eau optimale malgré l'inclinaison, le débit… Les quantités d'eau sont enregistrées et accessibles directement sur le logiciel.

$$(3)\quad \text{Vol app} = Q \times g \times Rr$$

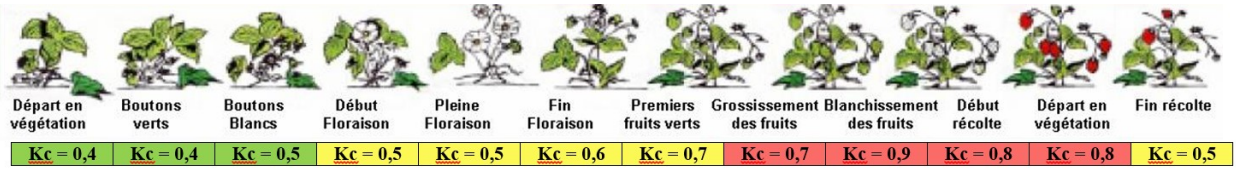
$$(4)\quad \text{Vol dr} = \text{Vol app} \times \%\text{drainage}$$

$$(5)\quad \text{Vol cons} = \text{Vol app} - \text{Vol dr}$$

Q = quantité d'eau par basculement (ml)
g = nombre de gouteurs sur les 5 m
Rr = nombre de basculements
Vol app = volume apporté (ml)
Vol dr = volume drainé (ml)
Vol cons = volume consommé (ml)

La fiabilité des relevés des volumes d'eau a été vérifiée par la partie de l'étude faite l'année précédente sur les mêmes parcelles. La mesure du logiciel en millimètre avait été comparée au volume réel apporté en litres. Les coefficients de détermination étant proches de 1 pour les quatre parcelles (0,94 à 0,98), la corrélation est validée et réutilisée pour cette partie de l'étude. Les quantités d'eau obtenues sont ensuite rapportées à l'unité de mètre linéaire, soit un sac de culture.

La méthode de calcul du bilan hydrique prend en compte l'évapotranspiration (ETP) de référence sur prairie, et les coefficients culturaux (Kc) des fraisiers en fonction du stade de développement. Les valeurs de l'ETP° sont données par une des stations météo, référence de Météo



Période avec stress hydrique possible, les besoins en eau restent faibles

Période à sensibilité au stress hydrique modérée, mais où l'irrigation présente un intérêt

Période durant laquelle le manque et l'excès d'eau ont des conséquences irrémédiables

Figure 5 : stades, périodes de sensibilité au stress hydrique et coefficients culturaux sur une variété de saison (document interne, 2016)

° cf liste des abréviations p. V

France pour la Dordogne, située sur le site de Douville. Les valeurs de Kc° diffèrent selon la région (conditions climatiques) et la variété ; les mesures utilisées sont celles données pour l'appui aux irrigants en Dordogne et Pyrénées Atlantiques multipliée par un coefficient de 0,7 pour les conditions sous serre (*Figure 7*). Toutes les variétés suivies étant des variétés remontantes, cela implique plusieurs cycles de production sur une saison.

Les coefficients utilisés correspondent aux stades phénologiques situés entre la pleine floraison et le début de récolte. Il est important de noter que les quatre parcelles sont en décalage de production de quelques jours, ce qui entraîne des différences entre les coefficients pour chacune d'entre elles. De plus, les valeurs d'ETP donnée par la station météo correspondent à des conditions climatiques de plein air. Sous serre, l'atmosphère est légèrement différente ce qui devrait impliquer une diminution de la valeur de l'ETP, d'où le coefficient de 0,7 estimé par Météo France.

Le calcul du bilan hydrique sur la saison de production permet de comparer les quantités d'eau apportées et les besoins théoriques du fraisier selon les conditions climatiques du bassin (*Figure 8*).

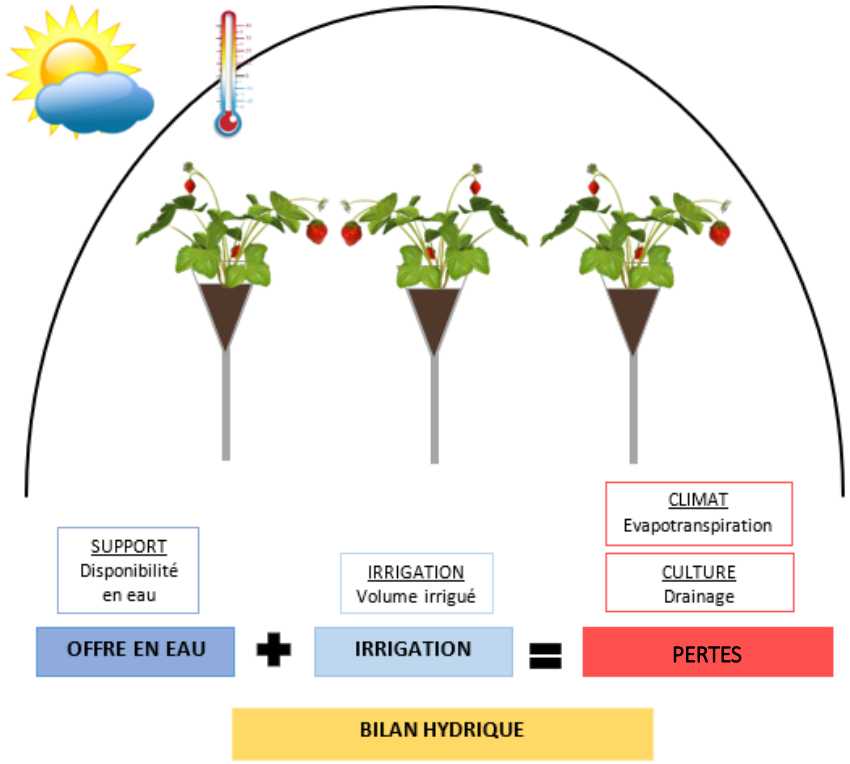


Figure 6 : schématisation de la méthode de calcul du bilan hydrique en fonction des éléments du système (Zerbino, 2018)

La conductivité (Ec) à l'apport et au drainage est mesurée en volt et atteste de la charge électrique des eaux. Cela donne une indication sur la concentration de celles-ci en éléments minéraux, et donc en engrais. Pour ce qui est de l'Ec dans la solution du sac, elle donne le même type d'informations sur la charge électrique dans le substrat. Elle peut être liée à la nature de ce dernier et avoir un impact important sur le système racinaire des plants.

(6) Ecf = moyenne (Ech)

Ecf = Ec mesurée par les sondes fixes (V)

Ech = Ec mesurée toutes les heures (V)

Deux fois par semaine au minimum, l'appareil portatif sera utilisé pour mesurer les conductivités des solutions d'apport et de drainage dans le but d'étalonner les sondes fixes. En effet, cet instrument relève des valeurs en mS/cm et va ainsi fournir une corrélation entre les voltages et la conductivité réelle. Les valeurs de pH à l'apport et au drainage sont également mesurées. L'appareil enregistreur aura la même fonction, mais sera placé dans le sac afin d'étalonner la sonde en contact avec le substrat.

(7) Coef Ec = Ecp / Ecf

Ecf = Ec mesurée avec les sondes fixes (V)
Ecp = Ec mesurée avec la sonde portative (mS/cm)

Tous ces relevés sont réalisés dans le but d'optimiser les apports en éléments dans les eaux d'irrigation en fonction de la variété produite, mais aussi des substrats utilisés. Couplées aux caractéristiques du support de culture et au comportement des variétés, la fertirrigation pourra s'adapter au plus près des besoins réels des fraisiers.

3.2 Analyse statistique

La comparaison de toutes ces données se fait sous forme d'analyses statistiques et de graphiques excel. Les volumes d'eau, les Ec, la température et l'humidité ont été comparées grâce à la méthode des ACP°, afin de déterminer quelles variables permettent d'expliquer au mieux la consommation d'eau par les plantes. Chaque variable a ensuite été étudiée (test de Shapiro-Wilk) pour chaque producteur, et comparée deux à deux si cela était possible (test T de Student et/ou analyse de variance ANOVA) grâce au logiciel R (fonction R commander et plug in FactoMineR).

L'emploi des moyennes (moy), écart type (σ), erreur type et intervalle de confiance (IC) à 95 % a donné des éléments comparatifs pour les données ne répondant pas aux critères précédemment évoqués. L'utilisation de l'intervalle de confiance sur des représentations graphiques a permis de voir si les modalités étaient significativement différentes les unes des autres sans l'application des tests statistiques.

(8) Erreur type = σ / √(nb de relevés)

(9) IC95% = moy +/- (2*erreur type)

° cf liste des abréviations p. V

Chapitre 3 : Résultats

1. Régime d'irrigation

Les régimes d'irrigation sont spécifiques à chaque parcelle ce qui complique leur comparaison. Toutefois, les volumes consommés peuvent être confronter aux besoins théoriques, qui peuvent être considérés comme les besoins minimaux, calculés à partir de l'équation de l'ETR° = ETP * Kc. La valeur d'ETP mesurée par la station météo a été adaptée aux conditions sous serre par la multiplication d'un coefficient de 0,7. Cela donne les résultats présentés dans le tableau 5. Le ratio calculé entre les volumes apportés et les besoins théoriques met en évidence une importante différence sur les quatre parcelles, ce qui prouve qu'il existe une possibilité de réduction des apports considérables avant d'atteindre les besoins minimaux des plants de fraisiers.

Tableau 5 : cumul des volumes apportés (Vol app), consommés (Vol cons) et drainés (Vol dr) par plant pour les quatre parcelles sur les mois de mai, juin et juillet. Les besoins théoriques sont exprimés sous la forme de l'ETM.

	Vol app (ml/plant)	Vol dr (ml/plant)	Vol cons (ml/plant)	ETM (ml/plant)	Vol app / ETM
parcelle 1	15 815,4	3 792,6	12 022,7	3 070,0	5,15
parcelle 2	16 012,5	8 184,9	7 827,5	3 886,1	4,12
parcelle 3	26 745,0	5 626,6	21 118,3	4 342,5	6,16
parcelle 4	18 594,4	3 190,4	15 403,9	4 365,6	4,26

Comme dit précédemment, le volume d'eau utilisé n'a de réel intérêt que s'il est comparé à la consommation réelle des plants. La *Figure 9* (agrandie en annexe *II)* montre quatre graphiques qui illustrent le tableau précédent. Les relevés présentés correspondent à la période de production la plus importante de la saison en termes de rendement pour les variétés remontantes suivies (entre 600 g et 1 kg de fruits produits par plant). En plus du tableau, les courbes montrent que les besoins théoriques sont largement inférieurs à la consommation réelle. En revanche la quantité apportée reste assez proche des volumes consommés des plants pour toutes les parcelles. Pour la parcelle 2 une période d'irrigation très importante est observée au début du mois de juillet. Cela correspond à un problème d'électrovanne survenu à la suite de travaux sur le réseau d'irrigation. La parcelle 3 suit la même tendance sur la période où le régime d'irrigation est piloté par le solarimètre[*].

Ces résultats peuvent être complétés par des tests statistiques, afin de comparer les régimes d'irrigation entre eux, et de déterminer si l'un d'entre eux est à favoriser. Pour procéder à des analyses statistiques valables, il est indispensable de vérifier la normalité des données. Dans le cas des apports, le test de Shapiro-Wilk donne pour les parcelles 3 et 4 des p-valeurs de 0.1858 et 0.2215 respectivement. En considérant les données normales et indépendantes, les tests de comparaison de moyenne de Student pour ces deux parcelles donne des p-valeurs inférieures à la valeur critique $\alpha = 0.05$ (t test = 2.086e-7 et Pr(>F)=0.001981). Ainsi, en termes de volume apporté par plant, les parcelles 3 et 4 ont des différences significatives illustrées par les valeurs de moyennes et écart type présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : valeurs moyennes et écart type des quantités d'eau apportées en ml par jour sur la saison de production pour les parcelles 3 et 4. Ces valeurs sont mesurées sur les 5 m étudiés tout au long du projet.

	3	4
moyenne (ml)	309,4	216,9
écart type	139,7	78,6

[*] cf glossaire p. IV

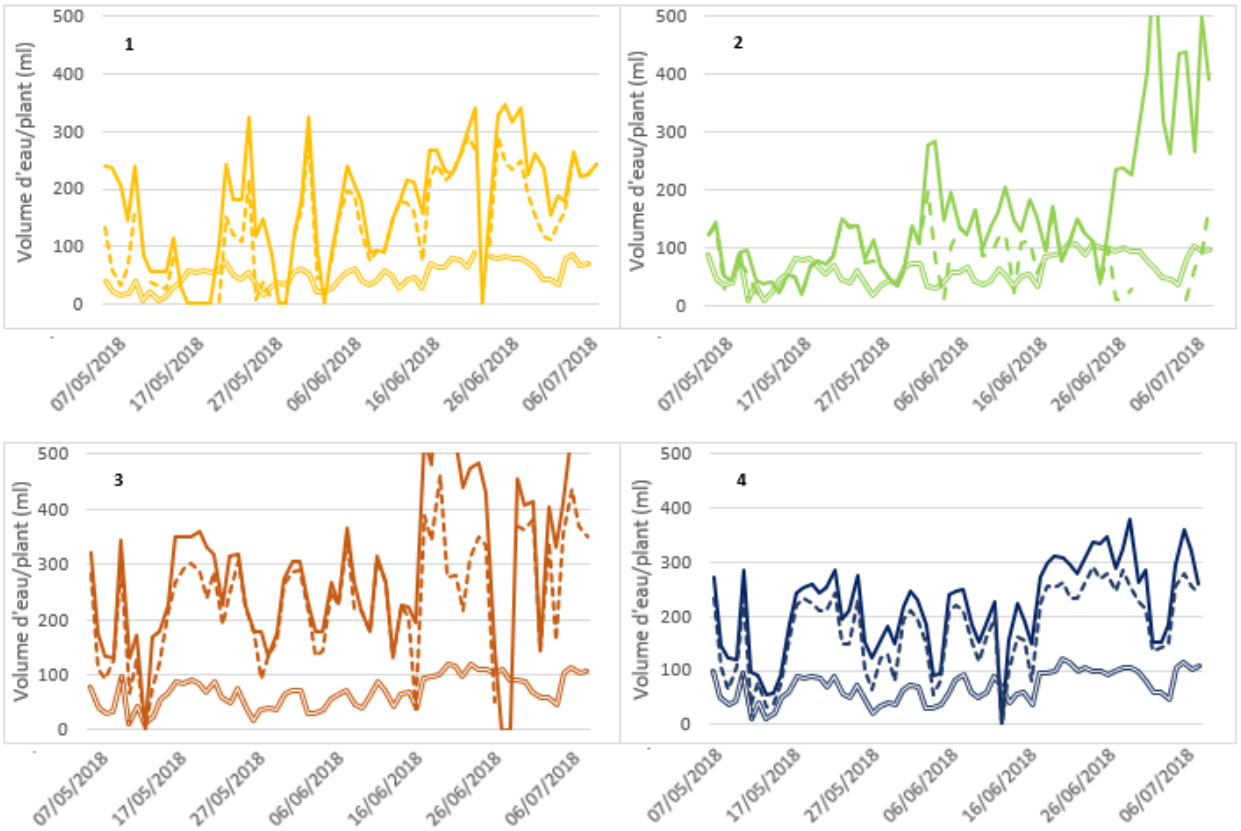


Figure 7 : évolution et comparaison des volumes apportés (⟶), volumes consommés (- - -), et besoins théoriques (⟹) pour les quatre parcelles sur toute la saison de production. Les valeurs hors cadre restent inférieures à 600 ml/jour pour les parcelles 2 et 3.

Cette comparaison permet ainsi de comparer la parcelle gérée avec le solarimètre, à une parcelle gérée quasiment au jour le jour par le producteur.

En ce qui concerne les parcelles 1 et 2, le test de Shapiro-Wilk donne des p-valeurs de 0.002472 et 1.851e-6 respectivement, soit largement inférieures à la valeur critique $\alpha = 0.05$. Ce résultat indique que la répartition des données correspondant aux apports/plant ne suit pas une loi normale, et ne peuvent donc pas être analysées de manière beaucoup plus approfondie.

Le cercle des corrélations présenté en annexe III a permis de confirmer l'interaction de certaines données avec le volume d'eau consommé par mètre linéaire. La variable du volume d'eau consommé est donc corrélée positivement au volume d'eau apporté, à l'Ec au drainage (Ec_{dr}).

2. Substrats

L'analyse de la normalité des données des Ec mesurées dans les sacs n'a fait ressortir qu'une p-valeur supérieure à 0.05 pour l'Ec du sac de la parcelle 4 : $Ec_s4 = 0.1458$. Les autres jeux de données ont des p-valeurs inférieures à la valeur critique $\alpha = 0.05$ ($Ec_s1 = 0.003899$, $Ec_s2 = 1.309e\text{-}14$, $Ec_s3 = 3.607e\text{-}12$) ce qui pose problème pour leur comparaison.

Tableau 7 : valeurs moyennes et écarts types de la conductivité dans le sac en mS/cm de chaque parcelle sur la saison de production. L'écart type témoigne des fluctuations observées sur les graphiques.

	1	2	3	4
moyenne (mS/cm)	0,52	0,18	0,59	1,40
écart type	0,11	0,03	0,18	0,11

Dans le tableau 7, les moyennes des différentes Ec_s varient d'un extrême à l'autre pour les parcelles 2 et 4, mais restent proches pour les parcelles 1 et 3. Bien que les écarts types soient relativement faibles, les valeurs d'Ec_s fluctuent plus ou moins (*Figure 10*). Les parcelles 2 et 3 n'évoluent quasiment pas, tandis que la parcelle 1 dessine quelques oscillations, et que la parcelle 4 montre de grandes amplitudes.

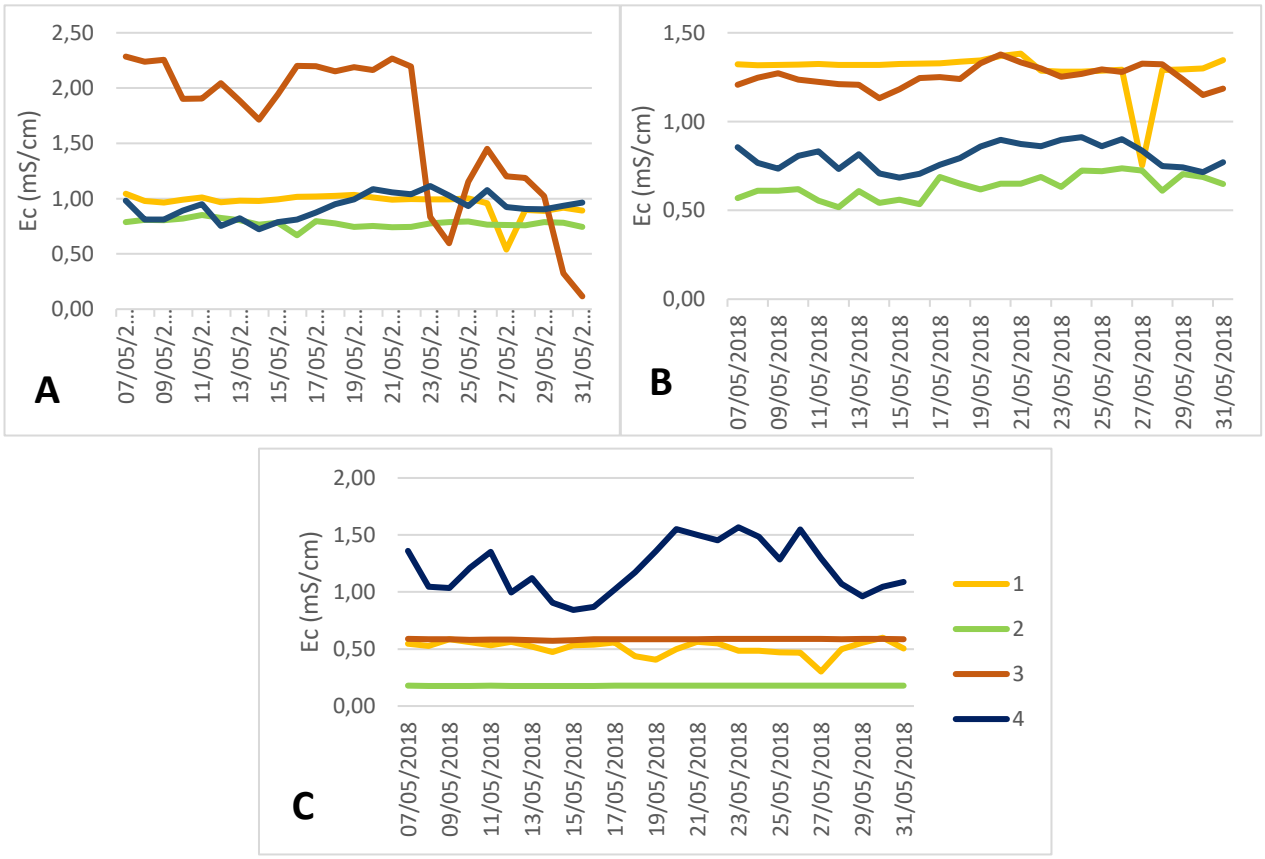


Figure 8 : évolution et comparaison des conductivités (Ec) sur le mois de mai à l'apport (A), dans le sac (B) et au drainage (C) pour les quatre parcelles

Pour l'Ec au drainage, des fluctuations sont présentes pour toutes les parcelles. Les parcelles 1 et 3 ont toujours une Ec_{dr} plus importante que dans le sac et à l'apport. La parcelle 2 a une Ec_{dr} plus importante que l'Ec dans le sac, mais plus faible que l'Ec à l'apport. La parcelle 4 a une Ec_{dr} plus faible que l'Ec dans le sac et que l'Ec à l'apport. En revanche, l'Ec_s est plus importante que l'Ec_{app} pour la parcelle 4 uniquement. Les mêmes tendances ont été observées sur

les mois de juin et juillet. L'importante valeur de l'Ec_{app} de la parcelle 3 au début du mois de mai est due à une mauvaise humectation de la sonde. Elle présente toutefois beaucoup de variations au cours des trois mois de relevés.

Le cercle des corrélations en annexe III a une fois de plus validé la corrélation entre l'Ec du sac (Ec_s) et l'Ec à l'apport (Ec_{app}). Il met également en évidence que ces deux variables n'ont pas directement d'influence sur le volume d'eau consommé par les plants. Le comportement de ces deux conductivités est toutefois intéressant pour les informations qu'il donne au sujet de la consommation des fraisiers en éléments minéraux.

3. Installations

Les caractéristiques des installations se sont résumées aux variations de températures et d'humidité dans les abris. Il s'agit des principaux facteurs responsables du phénomène d'évapotranspiration, et donc de consommation d'eau des plantes.

La normalité de chaque jeu de données de la température intérieure des différentes installations n'est pas validée par le test de Shapiro-Wilk. Cependant, les valeurs d'humidité montrent toutes des p-valeurs supérieures à la valeur critique $\alpha = 0.05$. Une comparaison de moyenne par le test de Student a ainsi permis de montrer que les humidités des parcelles 1, 2 et 4 étaient significativement différentes de celle de la parcelle 3. Cette différence se traduit par une humidité relative moyenne inférieure de 8% par rapport aux autres parcelles. En plus de cette faible humidité, la parcelle 3 à une température maximale plus importante de 4°C par rapport aux parcelles 1, 2 et 4 (tableau 8). Ces 4°C supplémentaires sur la totalité de la période représentent une augmentation de la température moyenne journalière d'environ 1,5°C.

Tableau 8 : moyennes des températures (T°max en °C) et humidités (H en %) maximales observées sur chaque parcelle sur toute la saison de production

	1	**2**	**3**	**4**
	T°max	**T°max**	**T°max**	**T°max**
moyenne (°C)	24,78	24,20	28,71	24,19
	H	**H**	**H**	**H**
moyenne (%)	77,13	80,44	71,26	80,52

Encore une fois, le cercle des corrélations en annexe III confirme l'intérêt des observations résumées par le tableau précédent. Les corrélations positive de la température et négative de l'humidité avec le volume d'eau consommé, prouvent qu'il est indispensable de jouer sur ces deux facteurs pour réduire la consommation d'eau.

Chapitre 4 : Discussion

1. Pilotage de l'irrigation

Dans un premier temps, nous avons choisi de comparer les régimes d'irrigation afin de déterminer les postes à améliorer en vue d'une automatisation du pilotage de la fertirrigation.

Comme les résultats le montrent, la variabilité des quantités d'eau consommée est liée à plusieurs critères. Il est important de préciser que même si le fraisier est considéré comme un plant fragile sur certains points, il possède une grande capacité d'adaptation à ses conditions de culture (Bergeron, 2010). En effet, la consommation en eau de ce dernier dépend principalement du volume apporté. Plus le volume est important, plus le fraisier pourra absorber d'eau. En revanche, la valeur de la consommation d'eau correspond à la quantité drainée soustraite à la quantité apportée. Nous pouvons donc imaginer qu'une partie a été absorbée par le sac et non pas directement par la plante. Or, un apport peu fréquent ou mal maîtrisé en termes de volume provoque rapidement une perte de rendement, de qualité gustative et esthétique des fruits. Cela est essentiellement dû à de mauvais apports d'éléments présents dans les eaux d'irrigation fertilisées (Shock, 2011).

La comparaison de cette valeur à celle des besoins théoriques calculés avec la méthode des coefficients culturaux est également intéressante (Bergeron, 2010 ; Anderson, 2016). Les coefficients culturaux sont trop incertains pour être utilisés comme seuls référents. Ils ne prennent pas forcément en compte toutes les données climatiques de la région concernée, ni la variété produite, et n'ont quasiment jamais été retestés. Les valeurs des coefficients suivent tout de même les stades phénologiques principaux, mais correspondent à une quantité d'eau nécessaire pour le maintien d'une activité vitale de la plante, et pas forcément la quantité requise pour une production commerciale. De plus, ils ne concernent que les besoins en eau, et non pas en éléments nutritifs pour les plants, pourtant indissociables pour une conduite hors-sol en fertirrigation. Les besoins théoriques calculés à partir des coefficients culturaux de Boyer (2015) sont ainsi 2 à 6 fois inférieurs au volume d'eau apporté. Les résultats confirment des apports 5 fois supérieurs aux besoins. En revanche, la quantité d'eau consommée par les fraisiers est en moyenne seulement 1 fois inférieure à la quantité d'eau apportée. Ainsi, la marge de réduction semble plus faible en pratique, mais permettrait tout de même de réduire la durée d'arrosage, ou encore de diminuer la fréquence des arrosages journaliers.

Globalement, la comparaison entre les quatre installations reste compliquée étant donné qu'elles possèdent chacune des modalités différentes (temps d'arrosage, nombre de goutteur, débit, volume des sacs, nombre de plants par sac…). Les valeurs ont donc toutes été rapportées à l'unité du plant, plus parlant pour les producteurs, puis à l'unité du mètre linéaire pour les analyses statistiques. En effet, il s'agit d'une échelle plus intéressante, notamment pour la consommation en eau, puisqu'elle dépend directement de la densité de plantation.

Le suivi des quantités d'eau apportées a également pu mettre en évidence certains dysfonctionnements du système de pilotage de l'irrigation. En effet, sur la parcelle 2, le volume d'apport a été très élevé pendant une bonne partie du mois de juillet à cause d'un problème d'électrovanne. Il a fallu plusieurs jours pour arriver à régulariser cette quantité, puisque le système dans sa globalité a été mal dimensionné et ne permet pas d'irriguer par blocs indépendants. Cela implique une même irrigation pour toutes les parcelles, sans forcément tenir compte des variétés ou du moins des stades de développement. En ce qui concerne la parcelle 3, certains pics ont été observés sur des périodes courtes qui correspondent à des jours de weekend. Sur cette parcelle, la fertirrigation est pilotée par le solarimètre qui ne tient compte que du rayonnement solaire, et non pas de la température et de l'humidité de l'air. Or, la consommation du fraisier dépend surtout de

ces deux facteurs, pas toujours liés à l'ensoleillement, surtout en début de saison de production, ou en été avec des temps orageux.

Ainsi, les valeurs de consommation "réelle" serviront de référence pour un pilotage plus adapté. Il s'agit d'une expérimentation qui se rapproche de projets mis en place par des centres d'expérimentation, mais avec une application directe chez les producteurs. L'objectif n'étant pas le même, des préconisations précises (volume apporté par mètre linéaire) et générales pour tous les producteurs sont quasiment impossibles. Un temps d'arrosage inférieur à 3 min ne permettant pas d'approvisionner toute la parcelle dans des conditions suffisantes, la seule possibilité reste de diminuer la fréquence d'arrosage. Actuellement à un arrosage toutes les heures ou heures et demi en période estivale, les producteurs peuvent envisager une pause de 2 heures entre les arrosages. Sur une journée, il serait ainsi possible de gagner au moins un arrosage par jour soit environ 1000 l / ha. L'utilisation du solarimètre est également à proscrire, puisque les producteurs se reposent sur cet outil et ne suivent pas forcément de près leur culture.

2. Conductivité et substrats

Dans un second temps, nous avons choisi d'observer le comportement des supports de culture en termes de conductivité électrique.

Le pilotage global de la fertirrigation est en général programmé par un ordinateur sur lequel sont rentrées des consignes de pH et de conductivité. Tout est dosé à partir des bacs d'eau et de solution à l'aide de pompe et de sondes pour vérifier les concentrations une fois les mélanges réalisés. Sur la période de production, la consigne d'Ec pour les quatre parcelles est normalement fixée à 1,2 mS/cm. Néanmoins, il s'agit d'une valeur moyenne pour la journée ce qui signifie que l'ordinateur peut envoyer certains apports à 1,5 mS/cm, puis à 0,9 mS/cm. Pour cette raison, toutes les données d'Ec étudiées ont été relevées toutes les heures, mais moyennées ensuite à la journée afin de faciliter la visualisation sur une période de trois mois. Les courbes issues des données montrent que les valeurs ne sont quasiment jamais à la consigne ce qui peut s'expliquer par un mauvais étalonnage des sondes dans les bacs de mélange.

Sur chaque parcelle, les sondes sont positionnées sur les sacs au plus haut du rang, recevant à priori le plus d'eau et d'éléments. Des mesures aléatoires sur les autres rangs, et à des points plus ou moins hauts sur chaque rang de chaque parcelle ont montré que les valeurs retenues étaient légèrement plus élevées (entre 0,1 et 0,3 de différence pour le pH et environ 0,2 mS/cm pour l'Ec) particulièrement dans les eaux de drainage. Les sondes Ec_{app} et Ec_{dr} sur la parcelle 3 sont placées dans des bacs et non dans des siphons comme pour les autres parcelles, ce qui peut éventuellement fausser les données. Les bacs étant vidés tous les matins, il y a toujours une période où les sondes ne sont pas en contact avec l'eau, et peuvent transmettre des valeurs aberrantes. Toutefois, les sondes dans les siphons peuvent aussi poser quelques problèmes, notamment lorsque les irrigations ne sont pas très importantes et que l'eau présente n'est pas toujours bien renouvelée. Enfin, les jours de fortes chaleurs, les arrosages ne sont pas tous couplés à un apport d'éléments. En général, les apports de l'après midi (plus utilisés pour réduire la température des sacs) sont des irrigations dites à l'eau claire, soit sans solution fertilisante. Or les producteurs de toutes les parcelles n'ont pas forcément fait analyser les eaux de départ, et ne savent pas quels éléments et/ou conductivité est envoyée à chaque arrosage d'eau claire.

Il est important de préciser que la mesure de l'Ec est une mesure de concentration, et que l'écart entre Ec_{app} et Ec_{dr} ne doit pas dépasser 25% au quel cas, il faudrait revoir la solution (Guérineau et al., 2003 ; D'Anna et al, 2003). Cela signifie que si :

- Ec apport > Ec drainage = pas assez d'éléments, forte consommation du fraisier
- Ec apport < Ec drainage = trop d'éléments, faible consommation du fraisier

- Ec apport = Ec drainage = bonne quantité d'éléments

L'Ec_{app} est quasiment identique pour les parcelles 1, 2 et 4 à quelques variations près qui peuvent être dues à des erreurs de relevés de la sonde. Pour la parcelle 3, les variations peuvent s'expliquer par des modifications régulières des consignes en fonction du suivi de l'Ec_{dr} par le producteur. Les parcelles 2 et 4 sont toujours à $Ec_{app} >= Ec_{dr}$ donc les fraisiers ont toujours la quantité d'eau et d'éléments qu'il leur faut, voire légèrement trop. En revanche, les parcelles 1 et 3 sont toujours à $Ec_{app} < Ec_{dr}$ ce qui implique que les fraisiers ont toujours trop d'éléments. Cela peut provoquer des pertes racinaires et des pertes de rendement, c'est pourquoi il est important de surveiller que les valeurs de drainage ne dépassent pas 2 ms/cm. A noter tout de même que la corrélation trouvée entre les sondes fixes et la sonde portative pour Ec_{app} et Ec_{dr} peut être remise en question en termes de fiabilité. L'annexe V montre la courbe de corrélation polynomiale reliant les deux valeurs. Etant donné que le coefficient R^2 ne dépasse pas 0,36 sur ces quelques valeurs, il serait utile d'affiner la valeur en faisant plus de mesures.

D'après les résultats, l'Ec_s est liée à l'$Ec_{app.}$ Elle est donc conditionnée par la température et l'humidité qui font varier les besoins du fraisier. Si la température est élevée, la plante consomme une grande quantité d'eau, mais pas forcément beaucoup d'éléments, ou inversement lorsque la température est plus faible. Dans ce cas, le rôle tampon du support de culture peut être intéressant (Pardossi et al., 2011 ; Prémont, 2015). Les parcelles 2 et 3 sont sur des sacs d'écorce compostée, et ont des Ec_s très stables dans le temps. Les valeurs sont cependant différentes entre les deux parcelles à cause d'une disparité dans le régime d'irrigation. La parcelle 2 est en moyenne irriguée 12 fois avec une Ec_{app} faible (0,8 mS/cm), alors que la parcelle 3 est en moyenne irriguée 8 fois avec une Ec_{app} autour de 1 mS/cm. Pour la parcelle 1 avec des sacs en fibres de coco, les variations montrent une petite amplitude avec une Ec_s relativement basse. En revanche, la parcelle 4 avec les sacs de mélange tourbe/écorce montre graphiquement des oscillations de grnde amplitude autour d'une valeur d'Ec_s qui peut être dangereuse pour le système racinaire. Il est possible que la tourbe conserve beaucoup d'éléments, ou même en produise, ce qui expliquerait cette forte conductivité. En effet, tous les substrats sont chargés avant leur mise en place, mais les valeurs d'Ec ne dépassent généralement pas les 0,5 mS/cm. Bien qu'il s'agisse de sacs de deuxième année, leur capacité de rétention doit encore être suffisamment élevée, et le volume d'eau contenu suffisamment chargé. Les deux autres substrats semblent bien mieux adaptés, ou en tout cas, beaucoup plus intéressants d'un point de vue de la conductivité, et aussi moins asphyxiant (plus drainant) pour les racines.

Toutefois, le coefficient trouvé par étalonnage de la sonde fixe, par une sonde portative, peut être erroné du fait de la faible quantité de relevés par rapport aux trois mois de suivi. Par manque de temps et de problèmes logistiques, l'enregistreur n'a pu être laissé qu'une semaine sur chaque parcelle, ce qui est faible pour être réellement fiable. Il pourrait être intéressant de le laisser beaucoup plus longtemps chez chaque producteur, et en pleine saison de production, pour voir si le comportement des substrats reste stable, ou s'il est modifié par le développement du plant. Comme l'a montré Ancay (2010) des sacs servant sur plusieurs années de culture ont tendance à faire baisser le rendement. La décomposition des substrats a donc un rôle important pour le développement des plants de fraisier, et l'Ec pourrait en être un indicateur. La concentration des solutions pourrait être abaissée à un équilibre correspondant à 6 meq d'azote pendant la période de production, ce qui permettrait d'alimenter la plante en éléments minéraux à chaque arrosage sans risquer de brûlures racinaires (Raynal Lacroix, 2012).

Toutes ces informations tendent à préconiser l'emploi de sac de substrat en écorce compostée ou en fibre de coco, avec la possibilité d'abaisser la consigne de conductivité (Ec) à l'apport à 1 voire 0,8 mS/cm. Le suivi de l'Ec au drainage devra toutefois être suivi régulièrement afin de savoir si des arrosages à l'eau claire sont toujours nécessaires. De plus, il serait préférable de ne pas réutiliser les sacs d'une année sur l'autre si le producteur veut garder un rendement maximal. Actuellement, il est impossible de donner une valeur précise concernant les rendements qui évoluent au cours de la saison, à cause de difficultés à la discussion de la part des producteurs.

3. Investissements dans les installations

Enfin, dans un dernier temps, nous nous sommes intéressés aux différences entre les types d'installations.

Le producteur en se référant à une autre typologie d'installation, associée à des coûts d'investissement, pourra affiner ses choix selon ses besoins et ses capacités. Aujourd'hui, une grosse majorité des serres de production hors-sol en Dordogne sont des tunnels en bâche plastique ; c'est le cas des parcelles 2 et 4. Les supports de culture sont ensuite posés sur des gouttières maintenues en hauteur par des piquets de bois. Chaque tunnel compte normalement trois rangs, et il est généralement sur sol enherbé. Quelques exploitations possèdent malgré tout des infrastructures plus grandes, et plus sophistiquées ; c'est le cas des parcelles 1 et 4. Il s'agit pour la plupart de multichapelles à simple ou double parois pouvant accueillir plus d'une dizaine de rangs. Les supports de culture sont positionnés sur des gouttières suspendues et le sol est généralement bâché.

La température moyenne plus élevée de la parcelle 3 s'explique par plusieurs facteurs. Il s'agit d'une multichapelle simple paroi, au sol bâché et sans ouvrants latéraux et supérieurs. La simple paroi isole peu de la chaleur, qui ne peut pas s'évacuer par des mouvements d'air. L'absence de végétation au sol ne permet pas de rafraîchir l'air ambiant ni de l'humidifier. Il s'agit des mêmes phénomènes observés dans les villes avec la mise en place d'espaces enherbés pour limiter les îlots de chaleur urbains (Musy, 2014). Le sol bâché peut aussi être une explication à l'humidité relative beaucoup plus faible dans la parcelle 3 et légèrement plus faible dans la parcelle 1. Pour cette dernière, la double paroi et/ou l'utilisation de voile d'ombrage permettent de maintenir une température moyenne relativement proche de celle des tunnels. Les parcelles 2 et 4 en plus d'être enherbées et ainsi plus humides, sont également plus courtes que les deux autres parcelles, ce qui permet des mouvements d'air plus importants à l'intérieur du tunnel. A noter que le coût d'installation d'une serre multichapelle se situe entre 15 et 23 €/m² montage compris, contre 2 à 5 €/m² pour des abris de type tunnels (Guérineau et al., 2003). Bien sûr les infrastructures conditionnent aussi les créneaux de production, et donc les bénéfices en fonction du marché visé.

Toutefois, les résultats montrent que la température à un effet positif sur la consommation d'eau alors que l'humidité a un impact négatif. La surconsommation d'eau est liée à une température élevée qui fait transpirer la plante, mais aussi à une humidité relative faible qui crée une différence de potentiel hydrique important, et renforce le phénomène de transpiration. De plus, si les sacs sont mal fermés/protégés, un phénomène d'évaporation peut également avoir lieu directement du substrat vers l'air (Anderson, 2016). Ces paramètres de température et d'humidité sont évidemment importants à prendre en compte pour le pilotage de l'irrigation, mais ils mettent surtout en péril la santé et le bon développement des plants. L'installation de tensiomètres à l'intérieur des sacs de la parcelle 3 pourrait être généralisée et plus suivie par les producteurs. La valeur optimale fixée par Anderson (2016) ou encore Bergeron (2010) se situe autour de -15 kPa. Il s'agit d'une valeur pour laquelle la plante devra fournir beaucoup d'énergie afin d'absorber l'eau, mais les valeurs observées actuellement avoisinent les -4 kPa en période chaude (nombreux arrosages). Une nouvelle valeur de référence pourrait être envisagée autour de -8 kPa, valeur minimale recommandée pour les productions maraîchères avec plasticulture par Simonne et al. (2003). Les nouvelles consignes seraient ainsi en lien direct avec l'activité racinaire des plants, ce qui permettrait une économie d'eau pouvant théoriquement aller jusqu'à 40 % du volume journalier (Shock, 2011 ; Bergeron, 2010 ; Anderson, 2016).

Plusieurs paramètres entrent ainsi en jeu dans le choix de la structure à mettre en place. Le coût de l'installation en elle-même ne suffit pas à préconiser un type de structure. A celui-ci s'ajoute les coûts engendrés par une année de production (changement des plastiques, blanchissement à la chaux, utilisation de voile d'ombrage…). De plus, la parcelle influence

grandement le choix de la structure, notamment en fonction de la surface disponible. Il est en effet plus facile d'installer des tunnels sur des petites parcelles, ou sur des surfaces en pente, qu'une multichapelle de dimensions généralement plus importantes.

Dans le cadre de ce projet, le soutien d'un centre d'expérimentation serait appréciable, afin de proposer rapidement des solutions aux fraisiculteurs. En effet, une expérimentation réalisée directement chez les producteurs aurait de gros avantages mais aussi de nombreux inconvénients : les installations ne permettaient pas de mettre en place des répétitions de suivi, ce qui pose question quant à la représentativité des résultats. De plus, les quatre parcelles ont des modalités différentes en termes de substrat et/ou de variété ce qui induit des besoins et des comportements variables, autant qu'une difficulté de comparaison de données.

Toutefois, la troisième année de réalisation du projet doit permettre d'obtenir des informations complémentaires afin de réellement affiner le pilotage de l'irrigation par les producteurs. Actuellement, leurs principaux objectifs sont :

- de diminuer la pression des maladies et ravageurs en suivant les règles des décisions nationales au sujet des traitements phytosanitaires et résidus tolérés dans les fruits,
- d'adapter les itinéraires culturaux en fonction des variétés afin de mieux gérer la qualité gustative et esthétique des fruits.

Pour la partie phytosanitaire, cela peut passer par une analyse plus poussée des différentes modalités de fertilisation (type d'engrais, concentration, traitements chimiques, PBI°, purins végétaux…). La deuxième partie lui est étroitement liée puisqu'il est possible d'étudier le comportement des substrats quant à leur capacité de rétention des éléments nutritifs et de l'eau, et de leur évolution au cours du temps (sur la saison de production et/ou d'une année sur l'autre). Cannavo & Michel (2013) ont déjà montré une influence de la taille des particules sur le développement racinaire, et Ancay (2010) une évolution des rendements due aux modifications des propriétés des sacs de culture d'une année à l'autre.

° cf liste des abréviations p. V

Conclusion

Aujourd'hui, la Nouvelle-Aquitaine est le principal bassin de production de fraises françaises, mais doit tout de même faire face à plusieurs difficultés. Bien que la Dordogne soit le deuxième département français en termes de surface, les espaces urbains s'étendent au détriment des surfaces agricoles. Une population vieillissante ne permet pas non plus de donner suite à de nombreuses exploitations, et la législation ne cesse d'évoluer rendant certaines productions peu rentables. Celle des fraises est légèrement moins touchée, mais se heurte à la concurrence des pays limitrophes. Elle reste toutefois une production à forte valeur ajoutée ce qui permet aux producteurs de n'avoir qu'une seule activité et de pouvoir investir régulièrement.

Dans ce mémoire, nous avons mis en évidence une marge de progression en termes de pilotage de l'irrigation et de la fertilisation. Les producteurs attendent en effet des conseils afin de piloter leur fertirrigation au plus près des besoins réels de leurs fraisiers. Cela passe donc par un suivi sérieux des quantités d'eau apportées en fonction de la période de production, mais également des besoins réels des plants sur la journée. Pour l'instant, quoique le bassin du Caudeau Louyre soit considéré comme déficitaire en eau, il n'existe aucune restriction officielle à l'usage de l'eau pour l'irrigation. Toutes les parcelles de fraises sont irriguées grâce à des eaux de forages, ce qui n'implique aucun coût supplémentaire pour les producteurs sur la saison. La diminution de leurs apports, du point de vue de l'eau n'est donc pas leur priorité, même si certains experts ont montré que la consommation d'eau pour la fraise hors-sol est supérieure à celle d'un maïs irrigué sur la saison de production.

En revanche, les apports d'engrais et/ou de traitements qui sont liés à l'irrigation les interpellent de plus en plus. La législation sur l'emploi de produits phytosanitaires supprime des substances actives d'une année sur l'autre, et ne propose pas toujours de solutions alternatives. Si certains produits ou méthodes peuvent être remplacés par d'autres substances et des techniques moins nocives, elles seront plus coûteuses pour les producteurs. Il semble donc indispensable d'approfondir les connaissances sur la physiologie des plants (besoins réels), et le comportement des substrats (capacités de rétention), pour transmettre ces informations afin de mieux sensibiliser les professionnels.

Le réchauffement climatique ouvre également des questionnements par rapport aux structures de production. Nous avons mis en évidence l'importance de la gestion de la température et de l'humidité dans les serres. Or, ne s'agissant pas de structures à la pointe de la technologie comme celles utilisées pour d'autres cultures (tomates, concombres), il faudrait agir sur le choix des matériaux et de l'architecture des tunnels et multichapelles. D'autant plus que ces modifications structurelles éviteraient des frais liés à des méthodes d'ombrage à la chaux assez discutables.

Plus globalement, d'un point de vue environnemental, très peu de producteurs se sont lancés dans la récupération de leurs eaux de drainage, et encore moins dans leur recyclage. Si l'impact économique ne paraît pour l'instant pas être le principal levier d'action, une étude sur l'impact environnemental pourrait sans doute les amener à des conclusions plus convaincantes. Toutefois, n'oublions pas que cet état des lieux et les préconisations formulés dans ce rapport, ne sont que les prémices d'une étude plus approfondie, qui devra mettre en relation divers protagonistes.

Sitographie

Agreste, 2017. *Mémento de la statistique agricole : Nouvelle Aquitaine* [en ligne]. 2017. S.l. : s.n. [Consulté le 12 juin 2018]. Disponible à l'adresse : http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R7517C04.pdf.

Aquiland, 2016. Aquiland - Terreaux. In : [en ligne]. 2016. [Consulté le 8 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.aquiland.fr/terreaux.

Degrav'agri, 2012. Types de plants de fraisiers. In : *Degrav-agri.fr* [en ligne]. 2012. [Consulté le 29 mars 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.degrav-agri.fr/types-de-plants-de-fraisiers-pxl-11_121_122.html.

Dietimiam, 2007. Présentation de la culture hors sol. In : *notre-planete.info* [en ligne]. 2007. [Consulté le 27 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.notre-planete.info/actualites/1337-culture_hors_sol.

Encyclopædia Universalis, 2018. Définition de fertirrigation. In : *Encyclopædia Universalis* [en ligne]. 2018. [Consulté le 27 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.universalis.fr/dictionnaire/fertirrigation/.

Hortidact, 2012. Les terreaux et substrats. In : [en ligne]. 2012. [Consulté le 8 août 2018]. Disponible à l'adresse : http://hortidact.eklablog.com/les-terreaux-et-substrats-c18918185.

Hortitecnews, 2017. Gestion de l'irrigation des cultures en Hors-Sol. In : *HortitecNews* [en ligne]. 8 novembre 2017. [Consulté le 8 août 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.hortitecnews.com/gestion-de-lirrigation-sol/.

Meilland Richardier, 2018. Fraisiers. In : *Meilland Richardier* [en ligne]. 2018. [Consulté le 29 mars 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.meillandrichardier.com/fruitiers/petits-fruits/fraisiers.

Netafim, 2012. Fraise. In : [en ligne]. 2012. [Consulté le 16 avril 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.netafim.fr/crop/fraise.

Peltier, 2017. Le bromure de méthyle contamine-t-il nos fruits ? In : *Futura* [en ligne]. 2017. [Consulté le 29 mars 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/medecine-aliments-source-produits-dangereux-1227/page/7/.

Zaid, 2014. Cours de physiologie végétale. In : *SlideServe* [en ligne]. 20 juillet 2014. [Consulté le 26 août 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.slideserve.com/dooley/cours-de-physiologie-vegetale.

Bibliographie

Ajwa, Klose, Nelson, Minuto, Gullino, Lamberti et Lopez-Aranda, 2003. Alternatives to methyl bromide in strawberry production in the United States of America and the Mediterranean region. In : *Phytopathologia Mediterranea*. 2003. Vol. 42, p. 220-244. DOI 10.14601/Phytopathol_Mediterr-1715.

Allen, Pereira, Raes et Smith, 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* [en ligne]. S.l. : FAO. [Consulté le 5 juillet 2018]. 56. ISBN 92-5-104219-5. Disponible à l'adresse : http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents.

Ameri, Tehranifar, Shoor et Davarynejad, 2012. Effect of substrate and cultivar on growth characteristic of strawberry in soilless culture system. In : *African Journal of Biotechnology*. 2012. Vol. 11, p. 11960–11966. DOI 10.5897/AJB-11-2524.

Ancay, 2010. Fraisiers sur substrat : quelles alternatives à la tourbe ? In : *Revue Suisse Viticulture Arboriculture Horticulture*. 2010. Vol. 42, p. 8.

Anderson, 2016. Détermination de la stratégie d'irrigation optimale de la fraise basée sur le potentiel matriciel du sol et un modèle climatique. In : . 2016. p. 76.

APREL, 2017. *Préconisations variétales Fraise* [en ligne]. S.l. [Consulté le 22 mars 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.aprel.fr/fiche_varietale.php.

Banaeian, Narges, Omid, Mahmoud et Ahmadi, Hojat, 2011. Energy and economic analysis of greenhouse strawberry production in Tehran province of Iran. In : *Energy Conversion and Management*. 1 février 2011. Vol. 52, p. 1020-1025. DOI 10.1016/j.enconman.2010.08.030.

Barret, Caudron, Combes, Flisiak, Hayoun, Jaulmes, Jenner, Manicacci, Petillon, Sgro et Targosz, 2018. Agriculture et changgement climatique en Dordogne : prospective à l'horizon 2050. In : . Périgueux. 2018.

Bergeron, 2005. Mieux irriguer avec les tensiomètres. In : . 2005. p. 7.

Bergeron, Daniel, 2010. Régie de l'irrigation goutte à goutte dans la production de fraises à jours neutres au Québec. In : . 2010. p. 58.

Bethere, Sīle, Seņņikovs et Bethers, 2016. Impact of climate change on the timing of strawberry phenological processes in the Baltic States. In : *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2016. Vol. 65, p. 48. DOI 10.3176/earth.2016.04.

Blanke et Cooke, 2004. Effects of flooding and drought on stomatal activity, transpiration, photosynthesis, water potential and water channel activity in strawberry stolons and leaves. In : *Plant Growth Regulation*. février 2004. Vol. 42, p. 153-160. DOI 10.1023/B:GROW.0000017489.21970.d4.

Bleiholder, Weber, Feller, Hess, Wicke, Meier, Van Den Boom, Lancashire, Buhr, Hack, Klose et Stauss, 2001. 2 : *Growth stages of mono and dicotyledonous plants*. S.l. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry.

Boyer, 2015. Appui technique aux irrigants d'Aquitaine, Pyrénées-Atlantiques, Campagne d'irrigation 2015. In : . 2015. p. 8.

CA Morbihan, 2011. *Intérêts agronomiques, sanitaires, et économiques de l'utilisation de substrats mycorhizés sur fraise de printemps et fraise remontante en hors sol*. 2011. S.l. : s.n.

Cannavo, Hafdhi et Michel, 2011. Impact of root growth on the physical properties of peat substrate under a constant water regimen. In : . 2011. Vol. 46, p. 6.

Cannavo et Michel, 2013. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. In : *Scientia Horticulturae*. février 2013. Vol. 151, p. 11-21. DOI 10.1016/j.scienta.2012.12.021.

Cantliffe, Castellanos et Paranjpe, 2007. Yield and quality of greenhouse-grown strawberries as affected by nitrogen level in coco coir and pine bark media. In : *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. 2007. Vol. 120, p. 157-161.

Carmentran-Delias, 2016. *Fraisier: matériel végétal, les types de plants*. 2016. S.l. : s.n.

Chaves, Maroco et Pereira, 2003. Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. In : *Functional Plant Biology*. 2003. Vol. 30, p. 239. DOI 10.1071/FP02076.

Coquelet, Izard, Navatel, Poncet et Taussig, 2003. La fraise en culture suspendue. In : . 2003. p. 6.

Cormier, 2015. *Gestion optimisée de l'irrigation du fraisier à jours neutres*. Maîtrise en génie agroalimentaire. Québec : Université Laval.

Coste et Michel, 2017. *Influence de la teneur en eau initiale sur l'aptitude à la réhumectation de substrats organiques horticoles*. Angers.

CTIFL Balandran, 2017. Produire des fraises en culture sur substrat. In : . S.l. novembre 2017.

D'Anna, Incalcaterra, Moncada et Miceli, 2003. Effects of different electrical conductivity levels on strawberry grown in soilless culture. In : *Acta Horticulturae*. mai 2003. Vol. 609, p. 355-360. DOI 10.17660/ActaHortic.2003.609.53.

Darnell et Stutte, 2001. Nitrate concentration effects on NO3-N uptake and reduction, growth, and fruit yield in strawberry. In : *Journal of the American Society for Horticultural Science. American Society for Horticultural Science*. 1 octobre 2001. Vol. 126, p. 560-563.

García Morillo, Martín, Camacho, Rodríguez Díaz et Montesinos, 2015. Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation. In : *Agricultural Water Management*. mars 2015. Vol. 151, p. 43-51. DOI 10.1016/j.agwat.2014.09.021.

Gisleröd, Selmer-Olsen et Mortensen, 1987. The effect of air humidity on nutrient uptake of some greenhouse plants. In : *Plant and Soil*. 1 septembre 1987. Vol. 102, p. 193-196. DOI 10.1007/BF02370702.

Grant, Johnson, Davies, James et Simpson, 2010. Physiological and morphological diversity of cultivated strawberry (Fragaria×ananassa) in response to water deficit. In : *Environmental and Experimental Botany*. mai 2010. Vol. 68, p. 264-272. DOI 10.1016/j.envexpbot.2010.01.008.

Gravel, 2013. Comprendre la physiologie du fraisier et ses besoins, simplement. In : *Journées horticoles de St-Rémi*. Conférence. S.l. 4 décembre 2013.

Gruda, 2009. Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? In : *Journal of Applied Botany and Food Quality*. 2009. Vol. 82, p. 141-147.

Guérineau, Bigey, Longuesserre, Navatel, Pommier et Raynal-Lacroix, 2003. *La culture du fraisier sur substrat*. CTIFL. S.l. : s.n. Hortipratic. ISBN 2-87911-202-8.

Gulen et Eris, 2004. Effect of heat stress on peroxidase activity and total protein content in strawberry plants. In : *Plant Science*. 1 mars 2004. Vol. 166, p. 739-744. DOI 10.1016/j.plantsci.2003.11.014.

Hoffman et Shannon, 2007. *Microirrigation for crop production*. USA.

Inouye, 2008. Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers. In : *Ecology*. février 2008. Vol. 89, p. 353-362. DOI 10.1890/06-2128.1.

Izard, Bosc, Caillol, Chaix, Chalaye, Ernout, Gasq, Goillon, Taussig et Veyrier, 2010. La fraise en culture sur substrat. In : . septembre 2010. p. 6.

Jolliet et Bailey, 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. 1 mars 1992. Vol. 58, p. 43-62. DOI 10.1016/0168-1923(92)90110-P.

Kerloch, Eric, 2016. Influence du développement racinaire et du régime hydrique sur l'évolution des propriétés physiques et hydrauliques de substrats horticoles organiques. In : . 2016. p. 136.

Khouni, 2009. Biologie et physiologie végétales. In : . 2009. p. 16.

Klamkowski et Treder, 2008. Response to drought stress of three strawberry cultivars grown under greenhouse conditions. In : *Journal of Fruit and Ornamental Plant and Research*. 2008. Vol. 16, p. 179-188.

Lemay, Caron, Dorais et Pepin, 2012. Defining irrigation set points based on substrate properties for variable irrigation and constant matric potential devices in greenhouse tomato. In : . 2012. Vol. 47, p. 12.

Lieten, 2013. Advances in strawberry substrate culture during the last twenty years in the Netherlands and Belgium. In : *International Journal of Fruit Science*. janvier 2013. Vol. 13, p. 84-90. DOI 10.1080/15538362.2012.697024.

Maher, Prasad et Raviv, 2007. *Soilless culture: theory and practice - chap 11 : organic soiless media components*. First edition. Amsterdam Boston Heidelberg : Elsevier. ISBN 978-0-444-52975-6.

Martínez-Ferri, Soria, Ariza, Medina, Miranda, Domíguez et Muriel, 2016. Water relations, growth and physiological response of seven strawberry cultivars (Fragaria×ananassa Duch.) to different water availability. In : *Agricultural Water Management*. janvier 2016. Vol. 164, p. 73-82. DOI 10.1016/j.agwat.2015.08.014.

Michel, 2010. The physical properties of peat: a key factor for modern growing media. In : . 2010. p. 7.

Michel, Schmilewski et Largant, 2015. *Growing media in France and Europe: inventory and current perspectives.* 2015. S.l. : Unpublished.

Musy, 2014. *Une ville verte: Les rôles du végétal en ville*. S.l. : Editions Quae. ISBN 978-2-7592-2171-4.

Neri, Baruzzi, Massetani et Faedi, 2012. Strawberry production in forced and protected culture in Europe as a response to climate change. In : *Canadian Journal of Plant Science*. avril 2012. Vol. 92, p. 1021-1036. DOI 10.4141/CJPS2011-276.

Nestby, Lieten, Pivot, Raynal Lacroix, Tagliavini et Evenhuis, 2004. Influence of mineral nutrients on strawberry fruit quality and their accumulation in plant organs. In : *Acta Horticulturae*. février 2004. Vol. 649, p. 201-206. DOI 10.17660/ActaHortic.2004.649.37.

Odet, Musard, Wacquant, Puel et Alegot, 1989. *Mémento fertilisation des cultures légumières*. CTIFL. S.l. : s.n. ISBN 2-901002-65-X.

Orsini, Alnayef, Bona, Maggio et Gianquinto, 2012. Low stomatal density and reduced transpiration facilitate strawberry adaptation to salinity. In : *Environmental and Experimental Botany*. septembre 2012. Vol. 81, p. 1-10. DOI 10.1016/j.envexpbot.2012.02.005.

Palencia, Martínez, Medina, Vázquez, Flores et López-Medina, 2009. Effects of climate change on strawberry production. In : *Acta Horticulturae*. juillet 2009. Vol. 838, p. 51-54. DOI 10.17660/ActaHortic.2009.838.6.

Pardossi, Carmassi, Diara, Incrocci, Maggini et Massa, 2011. *Fertigation and substrate management in closed soilless culture* [en ligne]. S.l. Università di Pisa. [Consulté le 14 mars 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.wur.nl/upload_mm/8/c/0/aa4b4486-a9db-429f-8b03-f19d4cec3ee6_Fertigation%20and%20Substrate%20Management%20in%20Closed%20Soilless%20Culture.pdf.

Parent, 2001. Besoins nutritifs et physiologie du fraisier. In : *Journées horticoles de St-Rémy*. Conférence. S.l. 2001.

Parent, Gendreau, Léveillée, Dupéré, Guilmain, Lampron, Lemay, Levert, Normandeau, Raymond, Thériault et Lambert, 2000. *La culture des fraises en serre : guide de production*. décembre 2000. S.l. : CIDES.

Peltier, 2017. Le bromure de méthyle contamine-t-il nos fruits ? In : *Futura* [en ligne]. 2017. [Consulté le 29 mars 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.futura-sciences.com/sante/dossiers/medecine-aliments-source-produits-dangereux-1227/page/7/.

Pirlak et Eşitken, 2004. Salinity effects on growth, proline and ion accumulation in strawberry plants. In : *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*. août 2004. Vol. 54, p. 189-192. DOI 10.1080/0906471040030249.

Prémont, 2015. *Irrigation, substrats et fertilisation dans la culture hors-sol du fraisier, des enjeux pour une production optimisée*. PhD Thesis. S.l. : Université Laval.

Quacquarelli, Baruzzi, Birolli, Bresolin, Boscaini, Lucchi, Magnani, Maltoni, Mirandola, Turci et Faedi, 2017. Effects of reducing fertilization and irrigation on strawberry productivity and fruit quality in Verona area. In : *Acta Horticulturae*. avril 2017. Vol. 1156, p. 289-294. DOI 10.17660/ActaHortic.2017.1156.44.

Raviv et Lieth, 2008. *Soilless culture: theory and practice - Chap 9 : Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses*. First edition. Amsterdam Boston Heidelberg : Elsevier. ISBN 978-0-444-52975-6.

Raynal Lacroix, Christiane, 2012. Optimiser les fertilisations : éléments clés de la qualité de la fraise. In : . 2012. p. 26.

Sarraf, 2011. *Optimisation de la fertilisation des fraisier remontants cultivés hors-sol*. Maîtrise en bilogie végétale. Québec : Université Laval.

Shock, 2011. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. In : . 2011. Vol. 46, p. 8.

Simonne, Studstill, Hochmuth, Olczyk, Dukes, Munoz-Carpena et Li, 2003. Drip irrigation: the BMP era - an integrated approach to water and fertilizer management for vegetables grown with plasticulture. In : *Drip Irrigation*. 2003. p. 17.

Tagliavini, Baldi, Lucchi, Antonelli, Sorrenti, Baruzzi et Faedi, 2005. Dynamics of nutrients uptake by strawberry plants (Fragaria×Ananassa Dutch.) grown in soil and soilless culture. In : *European Journal of Agronomy*. 1 juillet 2005. Vol. 23, p. 15-25. DOI 10.1016/j.eja.2004.09.002.

Tagliavini, Baldi, Nestby, Raynal-Lacroix, Lieten, Salo, Pivot, Lucchi, Baruzzi et Faedi, 2004. Uptake and partitioning of major nutrients by strawberry plants. In : *Acta Horticulturae*. 2004. p. 197–200.

Tanji et Kielen, 2002. *Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas*. Rome : FAO. FAO irrigation and drainage paper. ISBN 92-5-104839-8.

Tehranifar, Poostchi, Arooei et Nematti, 2007. Effects of seven substrates on qualitative and quantitative characteristics of three strawberry cultivars under soilless culture. In : *Acta Horticulturae*. septembre 2007. Vol. 761, p. 485-488. DOI 10.17660/ActaHortic.2007.761.67.

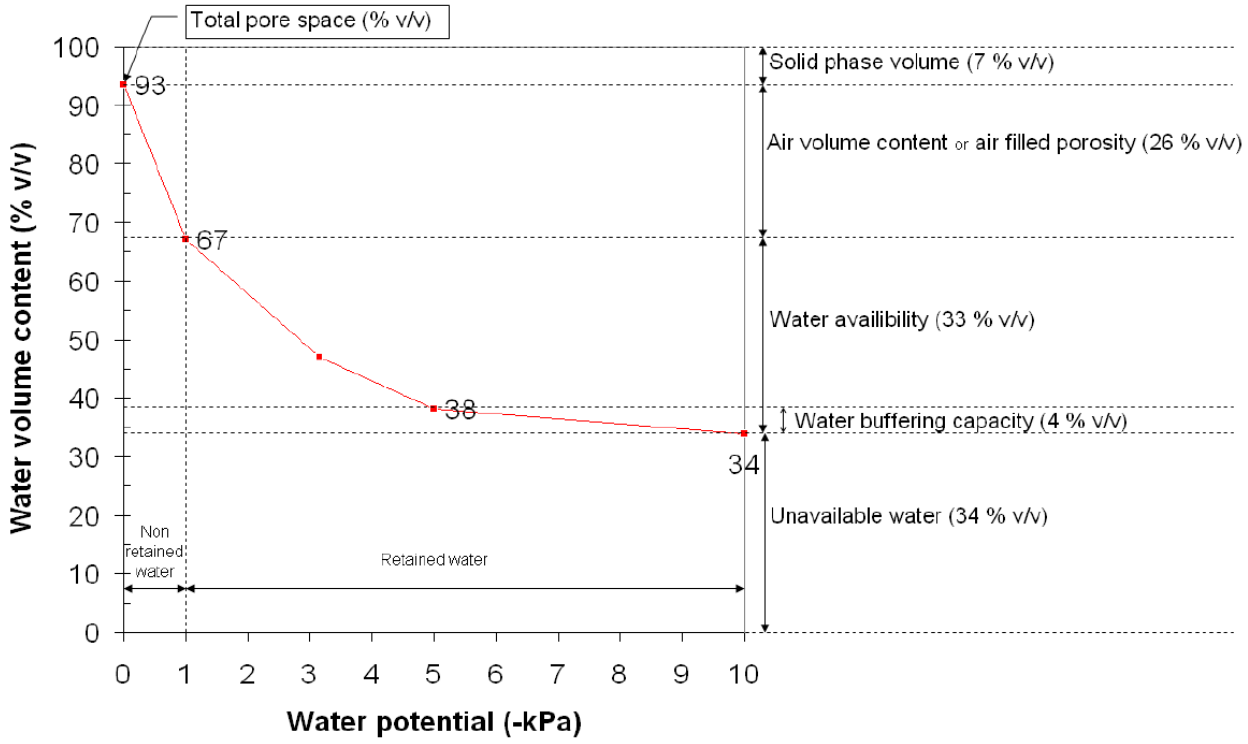
Vago, Katai, Sipos, Kovacs et Kincses, 2008. Changes of yield amount and some content parameters of strawberry (Fragaria ananassa) as affected by potassium and magnesium fertilization. In : *Protecţia Mediului*. 2008. Vol. 13, p. 223-228.

Yildirim, Karlidag et Turan, 2009. Mitigation of salt stress in strawberry by foliar K, Ca and Mg nutrient supply. In : *Plant Soil Environ*. 2009. Vol. 55, p. 213–221.

Annexes

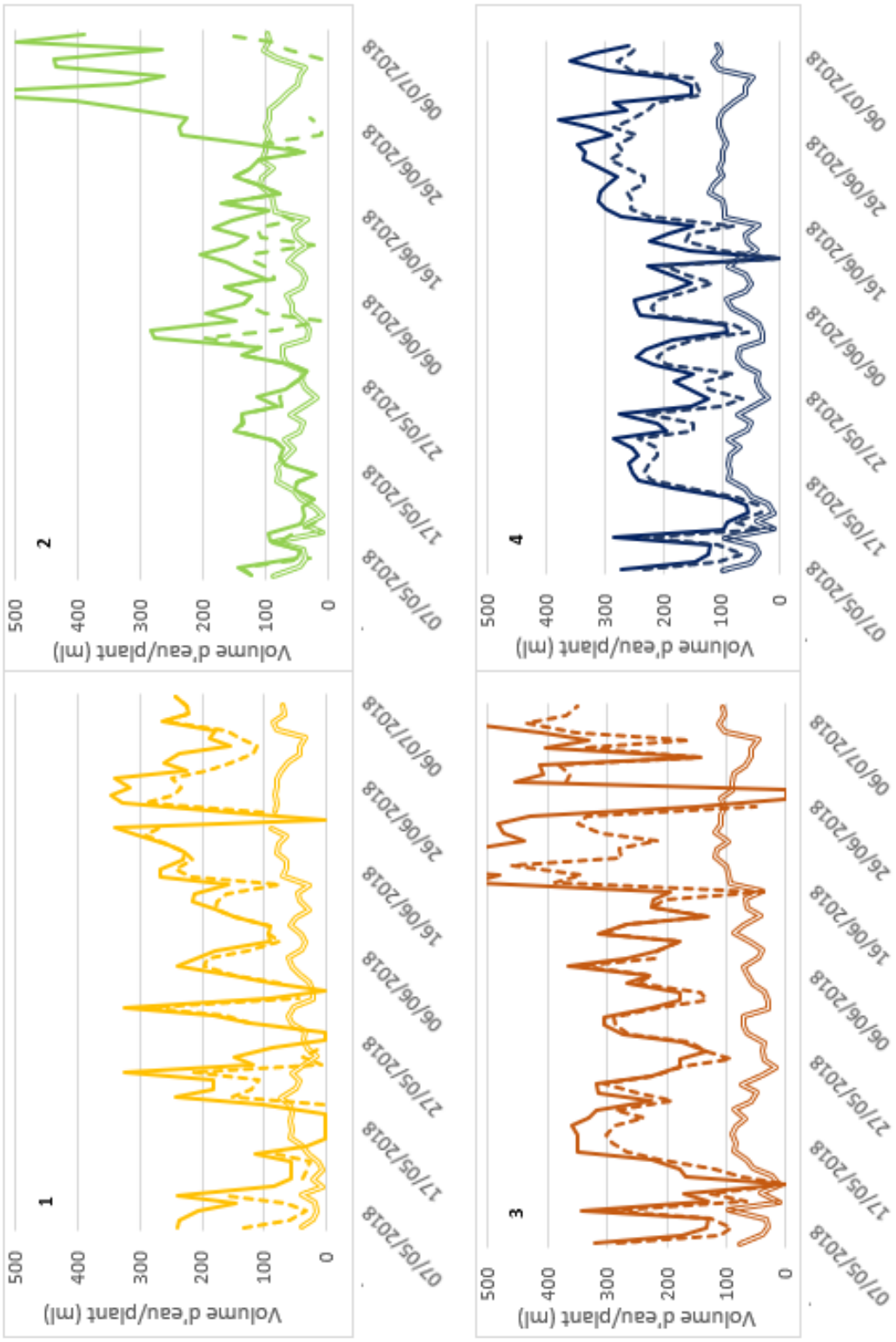
Annexe I

Courbe de rétention d'eau et caractéristiques pour une meilleure lecture (Michel, 2010)



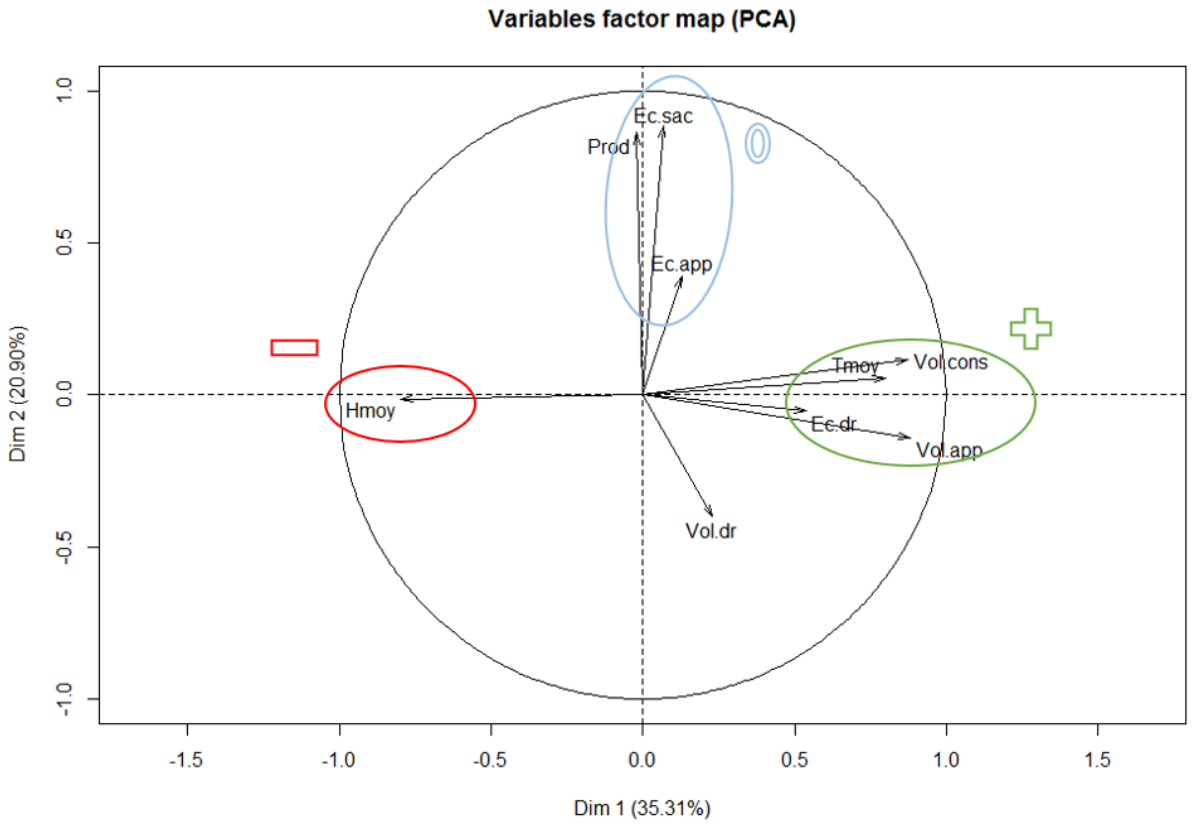
Annexe II

Evolution et comparaison des volumes apportés (—), volumes consommés (- - -), et besoins théoriques (═) pour les quatre parcelles sur toute la saison de production. Les valeurs hors cadre restent inférieures à 600 ml/jour pour les parcelles 2 et 3.



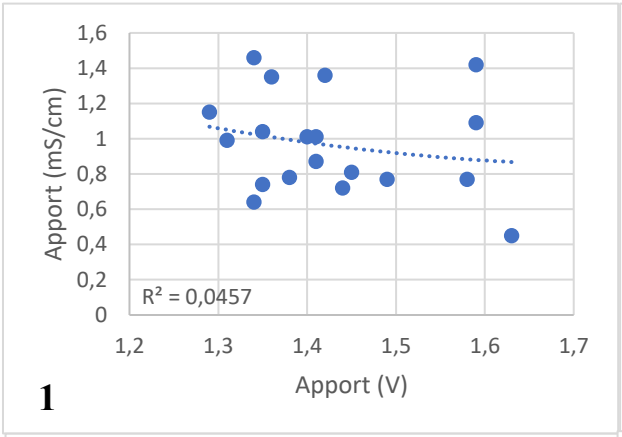
Annexe III

Cercle des corrélations obtenus après une analyse en composantes principales. Variable à expliquer : volume consommé.

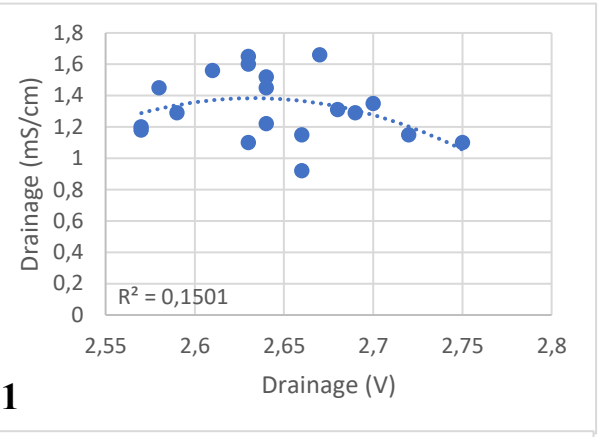


Annexe IV

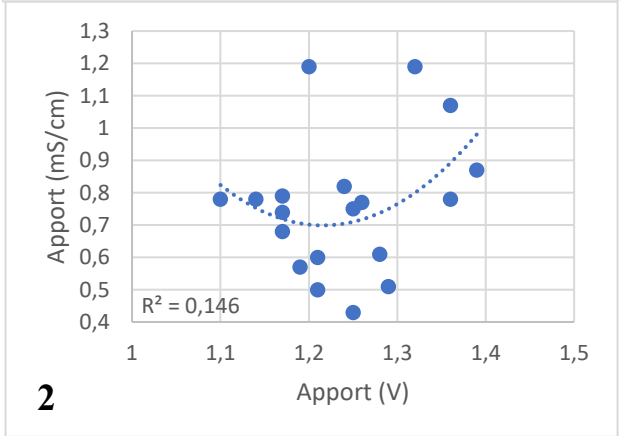
Courbes de corrélation pour chaque parcelle entre les valeurs de conductivités (Ec) mesurées par les sondes fixes en V, et par la sonde portative en mS/cm à l'apport et au drainage.



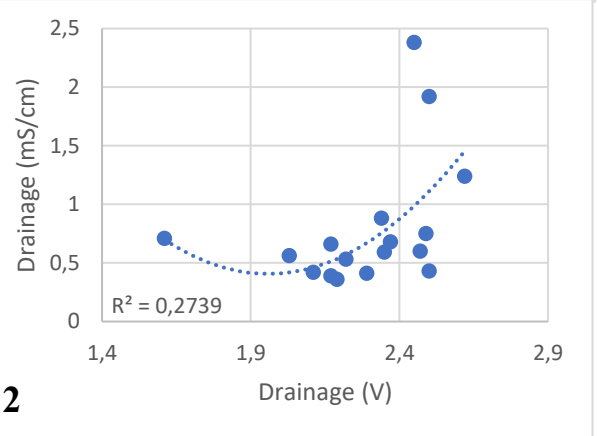
1



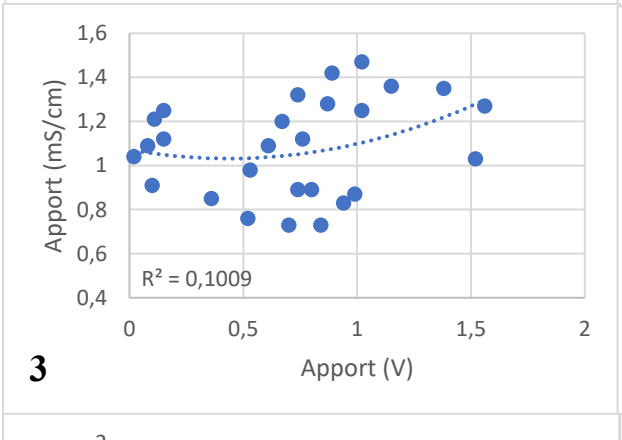
1



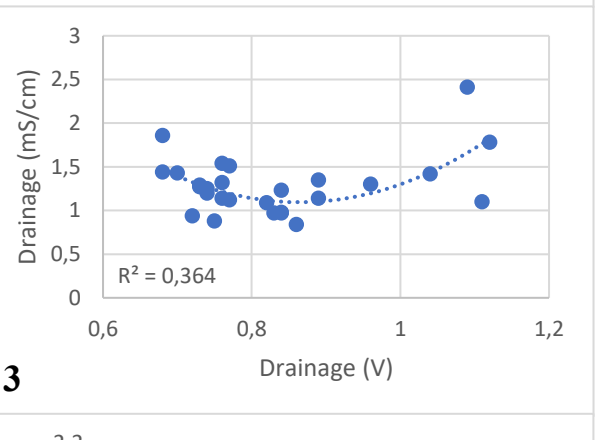
2



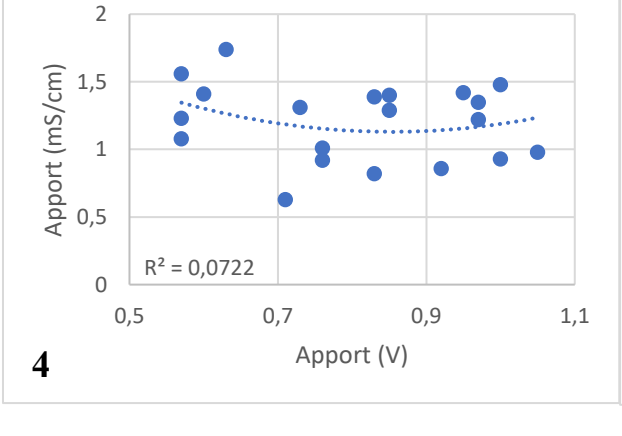
2



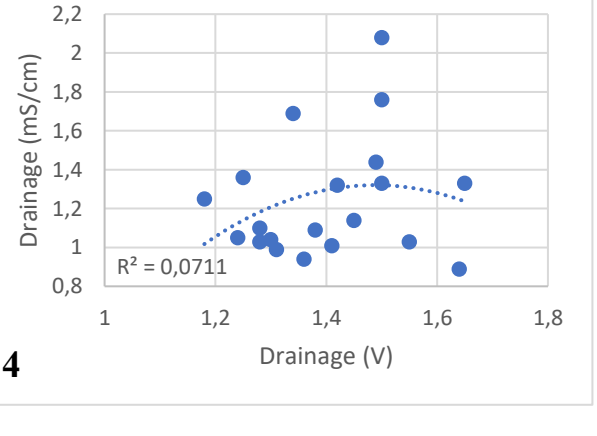
3



3



4



4

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : Ingénierie des Productions et Produits de l'Horticulture Enseignant référent : Patrice Cannavo
Auteur(s) : Léa Zerbino Date de naissance* : 25/10/1994	Organisme d'accueil : Chambre d'Agriculture de Dordogne, antenne Douville Adresse : Maison Jeannette 24140 DOUVILLE Maître de stage : Nicolas Fedou
Nb pages : 36 Annexe(s) : 4	
Année de soutenance : 2018	
Titre français : Optimisation de la fertirrigation dans un contexte de changement climatique en culture de fraises hors-sol Titre anglais : Fertigation optimisation in a climate change context for soilless strawberry production	

Résumé (1600 caractères maximum) :

Depuis quelques années, la production de fraises hors-sol gagne du terrain sur le département de la Dordogne. L'affranchissement du travail au sol a permis de gagner en confort pour la main d'œuvre, mais également de faciliter la gestion d'une culture. En ce qui concerne la fraise, son système racinaire superficiel en fait une production très demandeuse en eau, et son rendement en fruit implique une forte consommation d'éléments nutritifs. Les contraintes liées au contexte climatique actuel, aux nouvelles législations sur l'emploi de certaines substances, et à l'expansion de la production de fruits des pays limitrophes sont le quotidien des producteurs. Après avoir observé les caractéristiques des régimes d'irrigation, le comportement des différents substrats, et l'importance du type de structure en termes de température et d'humidité, certaines modifications des pratiques semblent envisageables. L'appui d'expérimentations supplémentaires ainsi que des préconisations spécifiques à chaque fraisiculteur leur assureraient un rendement égal, à coûts réduits. L'empreinte environnementale pourrait également être réduite, et servir d'exemple pour les autres producteurs et productions.

Abstract (1600 caractères maximum) :

For a few years, soilless strawberry production is gaining ground in Dordogne department. Soil enfranchisement permits to improve workforce comfort, and also to facilitate culture management. For strawberry, its shallow root system and its fruits yield, force to important water and nutrients consumption. Climatic, new legislation about chemical substance use, and fruit production expansion of frontiers countries constraints are the daily lives of producers. The observation of irrigation schemes, substrate comportment, and importance of structure for temperature and humidity could permit to bring some changes in practices. Supplements experimentations and specific preconisation for each strawberry producer could ensure an equal yield, and a costs reduction. The environmental footprint could also be reduced, and becoming example for other producers and productions.

Mots-clés : eau, substrat, conductivité, température, environnement

Key words : water, substrate, conductivity, temperature, environment