



HAL
open science

Vers plus de durabilité en maraîchage bio : évaluation d'un système d'abri innovant

Maureen Gicquel

► **To cite this version:**

Maureen Gicquel. Vers plus de durabilité en maraîchage bio : évaluation d'un système d'abri innovant. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03040031

HAL Id: dumas-03040031

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03040031v1>

Submitted on 4 Dec 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Année universitaire : 2019-2020

Spécialité : Sciences et Ingénierie du Végétal

Spécialisation : Agrosystèmes

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)

Vers plus de durabilité en maraîchage bio : évaluation d'un système d'abri innovant

Par : Maureen GICQUEL



Soutenu à Rennes, le 16/09/2020

Devant le jury composé de :

Président : Matthieu CAROF

Maître de stage : Maët LE LAN

Enseignant référent : Safya MENASSERI

Rapporteur : Olivier GODINOT

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>



Vers plus de durabilité en maraîchage bio : évaluation d'un système d'abri innovant

Mémoire de fin d'études

Par : Maureen GICQUEL

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Maët Le Lan, ma maître de stage, pour m'avoir accueillie à la station expérimentale d'Auray et accompagnée tout au long de mon stage. Nos discussions ont toujours été pertinentes et l'énergie dont elle a fait preuve a motivé mon implication. Grâce à l'équipe de la station, cette expérience s'est révélée passionnante, riche en apprentissages, tant sur le terrain que sur le traitement et l'analyse des données.

Je remercie également Marie Cordonnier, co-encadrante de mon stage. Sa bonne humeur et sa bienveillance ont facilité ma prise de marques à la station et mon intégration à l'équipe.

Merci à Christophe Girard pour sa patience à mon égard sur le terrain. Il a su partagé sa passion et son expérience technique en maraîchage. Merci à Charlotte Lefort pour son humour débordant et sa permanente motivation qui ont égaillé mes journées. Merci également à Elodie Gosmat pour sa bonne humeur et son sympathique accueil à mon arrivée.

Je tiens à remercier Safya Menasseri, ma tutrice, pour son soutien et sa disponibilité. Nos échanges en période de confinement m'ont permis de garder confiance en ce stage. Merci à Mattieu Carof, professeur référent à Agrocampus Ouest, pour avoir fait preuve de réactivité face à mon début de stage « à distance ».

Dans le cadre de l'action pénibilité du projet, j'ai pu travailler avec Thierry Robic et Esther Ansart, de la MSA Portes de Bretagne. Merci à eux de m'avoir accordé du temps pour l'analyse vidéo des postures et d'avoir partagé leur expertise.

Merci à Emmy et Rémi qui m'ont épaulé pendant la rédaction de ce mémoire.

Enfin, un grand merci à mes deux parents, qui m'ont toujours soutenu et accompagné dans mon cursus scolaire. Leurs précieux conseils m'ont permis de construire un projet professionnel correspondant.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
PARTIE I : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	2
1. Contexte de la filière maraîchère	2
1.1. Qu'est-ce que le maraîchage ?	2
1.2. Quelles sont les particularités des systèmes maraîchers en bio et sous abris ?	2
1.3. Quels sont les intérêts de la production maraîchère sous tunnel ?	3
2. Vers plus de durabilité en maraîchage bio sous abri : fragilités et levier	4
2.1. Pourquoi les systèmes maraîchers bio sous abris sont-ils fragiles ?	4
2.2. Les cultures intermédiaires multiservices comme levier de durabilité	4
2.3. La difficile intégration des cultures intermédiaires aux systèmes maraîchers sous abri	5
3. Concevoir des systèmes maraîchers innovants	6
3.1. Une innovation : le concept de tunnel mobile	6
3.2. Les hypothèses de durabilité associées à la mobilité du tunnel	6
3.3. Comment évaluer la durabilité d'un système innovant ?	7
PARTIE II : LE PROJET MENÉ À LA STATION EXPÉRIMENTALE D'AURAY	8
1. Un projet national : « Vers plus de durabilité en maraîchage bio »	8
2. La station expérimentale d'Auray	8
2.1. Localisation géographique et historique	8
2.2. Les conditions climatiques sur site	9
2.3. Les caractéristiques physico-chimiques du sol des parcelles	9
PARTIE III : MATÉRIELS ET MÉTHODES	10
1. Le système de culture de référence correspondant à une pratique maraîchère	10
1.1. L'abri de référence : le tunnel fixe	10
1.2. La succession culturale imposant une couverture permanente du sol	10
2. Le SdC innovant : un pilotage ambitieux pour accroître la durabilité	10
2.1. L'abri innovant : le tunnel mobile de la société Debernard	10
2.2. Une succession culturale reposant sur la mobilité du tunnel	11
3. Les variables d'étude de la culture de tomates pour la saison 2020	12
3.1. Les rendements moyens par date de récolte	12
3.2. Le suivi de croissance	12
3.3. Les températures journalières moyennes du sol sous abri	13
3.4. Le traitement des données « culture »	13

4. Les variables de comparaison des deux systèmes	13
4.1. Les consommations totales en intrants azotés et eau d'irrigation	13
4.2. Les rendements commercialisables par culture.....	14
4.3. Les temps de travaux.....	14
4.4. Le traitement des données « système »	14
5. Bilan économique : comparaison produits et charges des deux systèmes.....	14
5.1. Le poste de produits d'exploitation : la vente des légumes.....	15
5.2. Les six postes de charges.....	15
5.3. Le traitement des données économiques	15
6. L'évaluation de la durabilité du SdC innovant.....	15
PARTIE IV : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	16
1. L'étude de la culture de tomates pour la saison 2020	16
1.1. Les rendements moyens par date de récolte.....	16
1.2. Le suivi de croissance	16
1.3. Les températures journalières moyennes du sol sous abri.....	16
2. L'évaluation des conséquences du pilotage innovant.....	17
2.1. Les consommations totales en intrants azotés et en eau d'irrigation	17
2.2. Les rendements commercialisables par culture.....	17
2.3. L'échelonnement des périodes de production	17
2.4. Les temps de travaux.....	18
3. Bilan économique : comparaison produits/charges des deux systèmes	18
3.1. Le poste de produits d'exploitation : la vente des légumes.....	18
3.2. Les six postes de charges.....	19
4. Conclusion et évaluation de la durabilité du SdC innovant	19
PARTIE V : DISCUSSION.....	20
CONCLUSION	22
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	23

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

Les termes signalés par un astérisque (*) sont définis en index en fin de mémoire.

AB : Agriculture Biologique	% : pourcent
ACV : Analyse du Cycle de Vie	€ : Euro
CIMS : Culture Intermédiaire MultiServices	°C : degrés Celsius
CRAB : Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne	g : grammes
DEXiPM-FV : DEXi Pest Management Field Vegetables	ha : hectare
DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt	kg : kilogrammes
GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique	kg N : kilo d'azote
HT : Hors Taxes	m ² : mètre carré
IDEA : Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles	min : minute
MIN : Marché d'Intérêt National	mm : millimètre
MSA : Mutualité Sociale Agricole	t : tonne
OGM : Organisme Génétiquement Modifié	
P.d.T : Pommes de Terre	
pH : potentiel Hydrogène	
PE : PolyEthylène	
PVC : PolyChlorure de Vinyle	
RNM : Réseau des Nouvelles des Marchés	
RU : Réserve Utile	
SAU : Surface Agricole Utile	
SERAIL : Station d'Expérimentation Rhône-Alpes Information Légumes	
SdC : Système de Culture	
SMIC : Salaire Minimum de Croissance	
UTA : Unité de Travail Annuel	
UV : UltraViolets	

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Les quatre piliers de la durabilité d'une exploitation agricole
- Figure 2 : Positionnement du maraîchage diversifié au sein de l'ensemble des systèmes de culture
- Figure 3 : Deux types d'abris maraîchers : une serre multi-chapelle en verre et un tunnel froid
- Figure 4 : Symptômes de verticilliose sur plant et tige de Cucurbitacées
- Figure 5 : Exemple de succession culturale en maraîchage sous abri
- Figure 6 : Tunnel mobile auto-construit par Eliot Coleman : photo et schéma des déplacements
- Figure 7 : Toutilo et Oz, deux technologies pour réduire la pénibilité des opérations manuelles
- Figure 8 : Les tunnels fixe et mobile pour tester la désintensification sous abri
- Figure 9 : Diagramme ombrothermique de la station expérimentale d'Auray (56)
- Figure 10 : Vue aérienne de la station expérimentale et des deux parcelles étudiées
- Figure 11 : Plan du SdC de référence
- Figure 12 : Succession culturale établie pour le SdC de référence
- Figure 13 : Eléments de mobilité (gauche) et amarres à percussion (droite) du tunnel mobile
- Figure 14 : Plan du SdC innovant
- Figure 15 : Succession culturale établie sur trois zones pour le SdC innovant
- Figure 16 : Zoom sur les dates d'implantation et destruction des cultures en 2018
- Figure 17 : Vue intérieure du tunnel fixe le 29/04/2020
- Figure 18 : Evolution des rendements moyens de la tomate par date de récolte
- Figure 19 : Courbes d'évolution des paramètres du suivi de croissance sur tomates
- Figure 20 : Evolution de la température du sol sous abri
- Figure 21 : Consommations totales en intrants azotés et eau d'irrigation pour les deux SdC
- Figure 22 : Diagramme en barres du rendement moyen du SdC innovant en % du SdC de référence
- Figure 23 : Répartition des temps de travaux par système

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Principales caractéristiques des exploitations productrices de légumes en Bretagne
- Tableau 2 : Prix en vente directe de quelques légumes en Bretagne
- Tableau 3 : Comparaison de trois outils d'évaluation de la durabilité
- Tableau 4 : Variables étudiées à l'échelle des systèmes
- Tableau 5 : Composition des engrais organiques du commerce utilisés
- Tableau 6 : Postes de charges du bilan économique
- Tableau 7 : Montants des annuités des deux tunnels
- Tableau 8 : Rendements moyens des deux SdC
- Tableau 9 : Chiffres d'affaires par culture des deux systèmes
- Tableau 10 : Charges et produits des deux systèmes
- Tableau 11 : Approche de la durabilité du SdC innovant

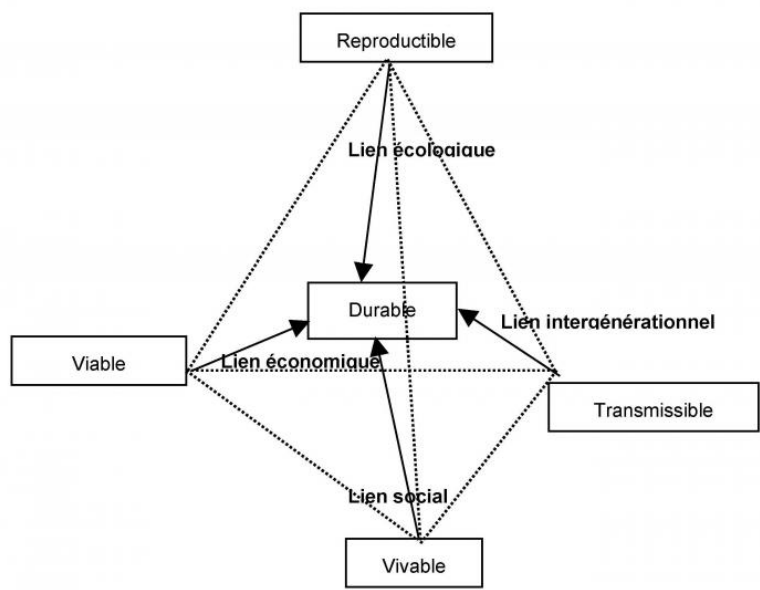


FIGURE 1 : LES QUATRE PILIERS DE LA DURABILITE D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE (LANDAIS, 1998)

INTRODUCTION

En 2017, la Bretagne est la troisième région française productrice de légumes, derrière les Hauts-de-France et la Nouvelle-Aquitaine (FranceAgriMer, 2018). Parmi les productions légumières, plusieurs filières se distinguent. Nous nous intéresserons à celle du maraîchage, en agriculture biologique, dont les caractéristiques seront étudiées en première partie.

Confrontée à des limites environnementales et économiques ainsi qu'aux attentes sociétales, la durabilité des systèmes maraîchers est remise en question. Dans sa définition la plus globale, la durabilité est « un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Brundtland et *al.*, 1987). Elle repose sur trois grands piliers : l'économie, l'environnement et la dimension sociale. Ces trois piliers peuvent être déclinés à la production agricole, qui se doit d'être saine et équitable pour les producteurs tout en restant rentable économiquement (Bonny, 1994). Landais ajoute un quatrième pilier aux trois précédents (Figure 1) : le lien intergénérationnel, qui se traduit par la transmissibilité de l'exploitation agricole (Landais, 1998). Nous verrons sous quels aspects la durabilité des systèmes maraîchers diversifiés, en agriculture biologique, est fragile.

Le développement de technologies innovantes pourrait apporter des éléments de réponse à cette fragilité. L'innovation est définie comme un processus, ou un produit, nouveau ou amélioré qui est accessible au public. Avec l'objectif de proposer des systèmes de culture maraîchers plus durables grâce à des innovations, le projet national « Vers plus de durabilité en maraîchage bio », porté par la station expérimentale d'Auray, développe deux actions. Une première action compare le robot Oz 440, produit par l'entreprise Naïo technologies, et le cobot Toutilo, de l'entreprise Touti'Terre, dans l'optique de réduire la pénibilité des opérations manuelles en maraîchage. Une seconde action évalue la durabilité d'un système de culture innovant sous abri, intégrant un tunnel mobile. Nous porterons notre attention à cette innovation en particulier.

Grâce à sa mobilité, ce tunnel fait apparaître plusieurs hypothèses de durabilité. Celles-ci sont exploitées, dans le cadre de l'expérimentation, lors du pilotage du système innovant. Il s'agit d'évaluer les conséquences de ce pilotage sur les variables de consommations en intrants azotés et en eau d'irrigation, de rendements et de temps de travaux à l'échelle du système. La problématique est la suivante : **en quoi l'intégration de matériel innovant, tel que le tunnel mobile, peut-elle accroître la durabilité des systèmes maraîchers bio sous abri ?**

Après une revue bibliographique, le projet et la station expérimentale d'Auray seront présentés. L'expérimentation sera ensuite détaillée à travers les deux systèmes de culture mis en place. Les hypothèses de durabilité et les principes de pilotage seront présentés pour le système innovant, avant d'aborder les résultats. Ils seront analysés et interprétés en deux temps : d'abord à l'échelle de la culture de tomates de la saison 2020 puis à l'échelle des systèmes. Ces résultats, ainsi que le protocole, seront enfin discutés avant de conclure.

ENSEMBLE DES SYSTEMES DE CULTURE



FIGURE 2 : POSITIONNEMENT DU MARAICHAGE DIVERSIFIE AU SEIN DE L'ENSEMBLE DES SYSTEMES DE CULTURE (CREDITS PERSONNELS)

TABLEAU 1 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES EXPLOITATIONS PRODUCTRICES DE LEGUMES EN BRETAGNE (AGRESTE DRAAF BRETAGNE, 2014)

NB : la classification se fait si au moins 70 % des surfaces de légumes sont dans une catégorie. Une centaine d'exploitations n'a pas de culture dominante.

Catégorie en 2010	Nombre moyen d'UTA	Surface moyenne (ha) de légumes	Nombre d'espèces de légumes cultivées
280 serristes	10	1,5	1 à 2, tomates principalement
320 maraîchers	2,5	5	10
2060 en légumes de plein champ frais	12,5	14	4
1440 en légumes pour industrie	1,4	11	1 à 2

PARTIE I : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Contexte de la filière maraîchère

1.1. Qu'est-ce que le maraîchage ?

Le maraîchage est une filière appartenant aux productions légumières, au même titre que celle des légumes d'industrie (Figure 2). Cependant, les contours de ces deux filières ne sont pas unanimes dans la littérature. Péron divise la production légumière en fonction du mode de production : les légumes frais de plein champ sont des systèmes extensifs alors que le maraîchage, par les rotations courtes qu'il induit, est un système intensif (Péron, 2006). Au sein de celui-ci, Péron distingue le maraîchage spécialisé du maraîchage diversifié. En maraîchage spécialisé, la surface cultivée peut atteindre soixante hectares, généralement dédiés à la production de quelques espèces de légumes. La commercialisation se fait par le biais de négoce, de centrales d'achat ou de coopératives, donc en circuits longs. Par opposition, le maraîchage diversifié s'intègre aux circuits courts*, limitant les intermédiaires entre les consommateurs et le producteur. Ce mode de commercialisation implique une diversification des espèces cultivées, pouvant aller jusqu'à cinquante légumes différents. D'autres auteurs définissent le maraîchage en fonction de la présence d'abris ou de l'occupation du sol. Ainsi, pour Le Berre, le maraîchage concerne la production de légumes frais sur des surfaces réservées exclusivement à cet usage, bien que les modes de production puissent être différents (Le Berre, 1972).

En France, en 2017, les cultures de légumes frais - hors production de semences - couvraient 221 930 ha de Surface Agricole Utile (SAU), dont 44 630 ha, soit 20 %, consacrés au maraîchage (Agreste, 2019). Les exploitations maraîchères ne représentent qu'un pourcent de l'ensemble des exploitations agricoles françaises, soit 5 535 exploitations (FranceAgriMer, 2018). A l'échelle régionale, les chiffres datent du dernier recensement agricole de 2010. La Bretagne comptait 48 000 ha de SAU en productions légumières, pour 4 210 exploitations. D'après la classification Agreste, seules 320 de ces exploitations étaient spécialisées en maraîchage (Tableau 1). Dans ce cas, elles sont caractérisées par un faible nombre d'Unité de Travail Annuel (UTA), une SAU d'environ 5 ha permettant la culture d'une dizaine d'espèces de légumes (Agreste DRAAF Bretagne, 2014).

La notion même de maraîchage est donc discutée dans la littérature en raison de la diversité des moyens de productions et des modes de commercialisation. De fait, les références bibliographiques et données technico-économiques sont peu disponibles pour cette filière. Pour ce mémoire, nous considérerons comme systèmes maraîchers les exploitations d'une surface proche de cinq hectares, incluant des abris et des surfaces de plein champ, où une large gamme de légumes est cultivée toute l'année dans l'optique d'une vente en circuits courts.

1.2. Quelles sont les particularités des systèmes maraîchers en bio et sous abris ?

Le maraîchage, dans l'ensemble de ses pratiques, peut être certifié « Agriculture Biologique » (AB). Cette certification répond au règlement communautaire européen n°834/2007. Celui-ci limite l'utilisation de produits phytosanitaires de synthèse et interdit le recours aux OGM dans les modes de production biologiques (Agence Bio, 2018). Le cahier des charges et la certification qui en découlent sont déclinés à chacune des productions agricoles. En maraîchage, des leviers tels que le choix variétal,



FIGURE 3 : DEUX TYPES D'ABRIS MARAICHERS : UNE SERRE MULTI-CHAPELLE EN VERRE ET UN TUNNEL FROID (CREDITS PERSONNELS)

TABLEAU 2 : PRIX EN VENTE DIRECTE DE QUELQUES LEGUMES EN BRETAGNE (CALMET & LE LAN, 2019)

En jaune sont indiquées les cultures d'été. En bleu, les autres types de cultures.

** : prix indicatifs en maraîchage conventionnel*

Légumes	Mode de production	Prix indicatif en vente directe*
Aubergines	Plein champ	<i>Non réalisable</i>
	Sous abri	2,50 à 4,50 €/kg
Concombres	Plein champ	<i>Non réalisable</i>
	Sous abri	0,80 à 1,20 € pièce
Tomates	Plein champ	<i>Non réalisable</i>
	Sous abri	2,50 à 5 €/kg selon la variété
Radis	Plein champ	1,50 € la botte

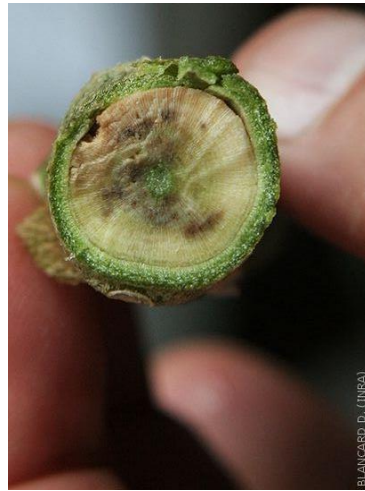
la rotation des cultures ou les moyens de lutte biologique* contre les bioagresseurs sont utilisés pour garantir une production de qualité. En 2017, la France comptait environ 36 700 exploitations en bio ou en conversion (FranceAgriMer, 2018).

Cette certification s'applique tant à la production de légumes plein champ qu'à celle de légumes sous abris. Les producteurs combinent ces deux modes de production. En France, les surfaces sous abris sont estimées à 9 100 ha (Lamont, 2009) et comprennent deux types de structures (Figure 3). D'une part, les serres, en verre ou en polyéthylène (PE), simple ou multi-chapelle, constituent des milieux aux conditions contrôlées. D'autre part, les abris froids, ou tunnels, sont largement utilisés en maraîchage diversifié. Ils se composent d'une structure simple formée d'arceaux métalliques ou en PVC, couverts d'une bâche en PE non opaque. Contrairement à la serre, un tunnel est une structure passive : il ne dispose pas de chauffage permanent ni d'un système automatisé de ventilation. Les conditions du milieu sont semi-contrôlées. D'après Kaiser et Ernst, les choix des matériaux, des dimensions et de la structure du tunnel ont une influence sur sa performance, donc sur le potentiel de rendement des cultures (Kaiser & Ernst, 2012).

1.3. Quels sont les intérêts de la production maraîchère sous tunnel ?

L'intégration d'un tunnel dans les systèmes maraîchers présente plusieurs intérêts. Elle permet notamment la création d'un microclimat répondant aux exigences des cultures d'été, parfois non cultivables en plein champ. Prenons l'exemple de la tomate, *Lycopersicon esculentum*, de la famille des Solanacées. D'origine tropicale, elle voit sa croissance limitée par une température inférieure à 10 °C, ce qui se traduit par un raccourcissement des entre-nœuds et un feuillage abondant. Sa température optimale de croissance se situe entre 17 et 25 °C en journée, pour une température nocturne comprise entre 13 et 17 °C. Avec ces températures, et dans le cas de semis précoces, la maturité de récolte est atteinte début juillet (Agrobio35, 2012). En Bretagne Sud, le climat doux et océanique est caractérisé par une amplitude thermique d'environ 13°C (données météo France). Avec ces conditions climatiques, la température optimale pour la production de tomates n'est atteinte qu'aux mois de juillet et août entre 2000 et 2015. La tomate ne peut donc pas être cultivée en plein champ sans l'implantation de tunnels. En revanche, sous tunnel, Perkus relève une réduction du vent de 34 à 41 % donc une réduction probable de l'évapotranspiration* (Perkus, 2018). La température sous abri est également modifiée : elle est supérieure d'environ 0,8°C par rapport à l'extérieur (Jenni & Dorais, 2008). Le microclimat ainsi créé permet la culture de la tomate. Or, les cultures d'été ont une forte valeur ajoutée, donc un intérêt économique certain pour le producteur (Tableau 2). Par exemple, un kilo de tomates sera vendu entre 2,50 € et 5 € selon la variété par rapport à une botte de radis, cultivable et récoltable en plein champ à la même période mais vendue 1,50 € (Calmet & Le Lan, 2019).

Les abris froids peuvent également permettre d'anticiper ou de rallonger les cycles de certaines cultures, notamment au printemps ou à l'automne. Miles et al. ont démontré que la tomate, au printemps, pouvait être plantée un à deux mois plus tôt sous abri par rapport au plein champ. Pour les cultures d'été que sont les poivrons et les tomates, la récolte peut débuter deux à quatre semaines avant celle de ceux produits en plein champ (Perkus, 2018). Les récoltes peuvent aussi être prolongées à l'automne grâce à la protection contre le gel (Miles et al., 2012). Par exemple, la récolte des framboises sous abri peut être prolongée de quatre semaines dans le Nord Minnesota (Perkus, 2018).



**FIGURE 4 : SYMPTOMES DE VERTICILLOSE SUR PLANT ET TIGE DE CURCUBITACEES
(BLANCARD & MAYET, 2013)**

Les systèmes maraîchers comprennent une diversité de caractéristiques qui complique leur définition. Nous nous focaliserons sur les systèmes maraîchers conduits en bio et sous tunnel. Cet abri froid présente deux avantages principaux pour les maraîchers : la production de cultures d'été et l'allongement de la période de production. Ces derniers garantissent une plus-value économique grâce aux cultures à forte valeur ajoutée. Dès lors, les producteurs cherchent à rentabiliser la surface sous abri par des successions culturales intenses.

2. Vers plus de durabilité en maraîchage bio sous abri : fragilités et levier

2.1. Pourquoi les systèmes maraîchers bio sous abris sont-ils fragiles ?

L'implantation d'un tunnel à un coût pour les producteurs. A l'achat, il est estimé à environ 17 €/m² (Debernard, comm. personnelle, 2020). Pour amortir cet achat, la surface sous abri est exploitée selon des successions culturales intenses, incluant deux grandes familles légumières : les Solanacées et les Cucurbitacées. Ces deux familles sont cultivées en alternance une année sur deux. D'un point de vue agronomique, le sol est très sollicité. Des maladies telluriques peuvent s'y développer, entraînant une baisse de rendement. C'est par exemple le cas de la verticilliose. Causée par un champignon tellurique, cette maladie atteint le système vasculaire des Cucurbitacées et Solanacées, entraînant un flétrissement du feuillage (Figure 4). La mauvaise alimentation du plant conduit à sa perte de vigueur, puis à son arrachage (Blancard & Mayet, 2013). La maladie est répandue sous abri, où les sols sont chauds et les délais de retour des cultures sensibles raccourcis. Pour maintenir une production malgré la contamination du sol, les producteurs se voient contraints d'utiliser des plants greffés. Ainsi, 100 % des concombres sous abri sont greffés (Calmet, comm. personnelle, 2020) malgré un coût d'achat du plant supérieur : il faut compter 4,20 € pour un plant greffé contre 1,0 € pour un plant franc (Calmet & Le Lan, 2019). Des successions culturales longues, excluant la pomme de terre, l'aubergine et le poivron, sont conseillées pour limiter l'impact de la maladie (Blancard & Mayet, 2013).

Ces maladies telluriques, qui interviennent suite à l'intensification des successions culturales, entraînent des baisses de rendement, donc un manque à gagner pour les producteurs. En pratique, cette baisse de rendement s'observe progressivement, parfois sans être liée aux symptômes souterrains. Ces problèmes sanitaires affectent donc la durabilité à long terme des systèmes, en particulier dans ses dimensions environnementales et économiques.

2.2. Les cultures intermédiaires multiservices comme levier de durabilité

Pour accroître la durabilité globale de ces systèmes, un levier existe. Il consiste à intégrer des cultures intermédiaires multiservices (CIMS), en période d'interculture, dans l'optique d'en tirer plusieurs services écosystémiques* (Charles et al., 2017). Trois d'entre eux sont listés ci-dessous, bien qu'ils restent dépendants de l'espèce cultivée et des pratiques culturales mises en œuvre. D'abord, l'implantation de cultures intermédiaires assure une couverture du sol, qui concurrence la levée des adventices présentes dans le sol. Les CIMS sont généralement détruites avant l'implantation de la culture suivante et sont soit enfouies par labour soit laissées à la surface du sol pour créer un paillage. Une expérimentation a mis en évidence la réduction de 90 % des adventices sur une parcelle de pois où le couvert végétal avait été laissé en surface (Robačar et al., 2015). De même, une concurrence se développe entre le couvert et les adventices pour l'accès à la lumière, conduisant à l'étouffement des jeunes adventices. Gebhard et al. montrent une étroite corrélation entre la quantité de biomasse de couverts de légumineuses associées et leur potentiel de concurrence aux adventices (Gebhard et al., 2013).

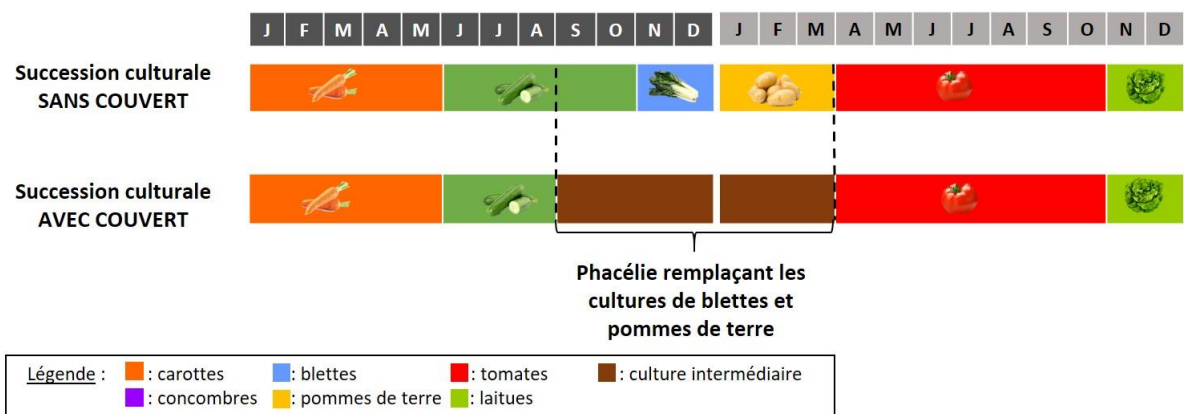


FIGURE 5 : EXEMPLE DE SUCCESSION CULTURALE EN MARAICHAGE SOUS ABRI (D'APRES CALMET & LE LAN, 2019)

De fait, les CIMS peuvent intervenir dans la gestion des adventices. Ensuite, pour des semis en été-début d'automne, la CIMS peut avoir une fonction de piège à nitrates. En période de drainage hivernal, l'azote minéral du sol est immobilisé sous forme organique dans la biomasse du couvert, réduisant les pertes par lixiviation par rapport à un sol nu (Constantin et *al.*, 2017). Enfin, la CIMS peut avoir un rôle d'engrais verts. L'azote immobilisé par la CIMS peut être restitué au sol : après enfouissement de la culture intermédiaire, l'azote organique contenu dans la plante est reminéralisé dans le sol, fournissant ainsi des unités d'azote à la culture suivante. L'indicateur pour évaluer cette quantité d'azote minéralisée est le rapport C/N de la CIMS. Constantin et *al.* indique que la proportion d'azote minéralisée, pour des rapports C/N compris entre 12 et 20, est généralement de 10 à 40 % de l'azote contenu dans les résidus de culture intermédiaire. Ainsi, lorsque l'effet engrais verts est maîtrisé, le pilotage de la fertilisation peut être revu à la baisse (Constantin et *al.*, 2017). Néanmoins, ce potentiel de réduction est indissociable des conditions pédoclimatiques et de l'itinéraire technique pratiqué.

2.3. La difficile intégration des cultures intermédiaires aux systèmes maraîchers sous abri

Malgré ces avantages environnementaux, l'intégration des CIMS aux successions culturales sous abri reste complexe. Les successions ne comprennent pas de période d'interculture. De fait, les dates d'implantation et de destruction de la CIMS chevauchent celle d'une culture maraîchère, voire s'y substituent, sans qu'aucun bénéfice économique n'y soit lié (Figure 5). Par exemple, pour une culture intermédiaire de phacélie, les semis en plein champ sont à réaliser entre septembre et novembre pour une destruction du couvert entre janvier et mars (Calmet & Le Lan, 2019). La phacélie occupe la surface sous abri au minimum cinq mois, période pendant laquelle les producteurs pourraient cultiver des pommes de terre primeur par exemple, dont ils tireraient un profit économique. Cette contrainte explique l'absence de cultures intermédiaires multiservices sous abri. D'un point de vue de la durabilité, les CIMS présentent des avantages environnementaux mais induisent une perte économique non soutenable pour les producteurs.

De plus, les avantages environnementaux et économiques des CIMS sont à nuancer. Les opérations d'implantation et de destruction des CIMS imposent des passages d'engins supplémentaires. Les charges de mécanisation et le coût énergétique, lié à un dégagement de gaz à effet de serre, augmentent par rapport à une conduite sans cultures intermédiaires (Launais et *al.*, 2014).

Ainsi, la durabilité environnementale et économique des systèmes de culture maraîchers, conduits sous tunnel, est fragile. Des leviers, comme l'introduction de cultures intermédiaires, pourraient être mis en œuvre mais sont freinés par l'intensité des successions culturales et l'intérêt économique des producteurs. Face à ces freins, des innovations* sont développées pour accroître la durabilité. Parallèlement se pose la question de l'évaluation de la durabilité selon ses trois piliers. En effet, il est nécessaire de pouvoir comparer les systèmes afin d'en identifier les leviers les plus intéressants et d'orienter les itinéraires techniques et culturaux*. Pour cela, des méthodes d'évaluation multicritères de la durabilité existent.



FIGURE 6 : TUNNEL MOBILE AUTO-CONSTRUIT PAR ELIOT COLEMAN : PHOTO ET SCHEMA DES DEPLACEMENTS (COLEMAN, 2009)

3. Concevoir des systèmes maraîchers innovants

3.1. Une innovation : le concept de tunnel mobile

Face à l'intensification des successions culturales, il fallait réfléchir à un levier permettant d'allonger les délais de retour des cultures d'été sans remettre en cause la rentabilité de la surface sous abri. L'innovation du tunnel mobile a vu le jour, notamment sur la ferme d'Eliot Coleman, aux Etats-Unis. Ce maraîcher diversifié a conçu puis expérimenté plusieurs tunnels mobiles, se déplaçant sur rails, roues ou patins, sur deux à quatre emplacements. Ces tunnels sont présentés dans son ouvrage *Des légumes en Hiver* (Coleman, 2009) et un guide d'auto-construction est disponible en ligne (Ave, 2014). Son dernier prototype auto-construit couvre 105 m², permettant un déplacement linéaire sur 60 m, divisés en quatre zones successives (Figure 6). D'autres maraîchers, en Europe, ont construit ce type de tunnel en auto-construction, ou s'y intéressent, pour répondre à leurs observations et besoins. En France, ce type de tunnel n'est commercialisé que depuis 2012 par certains constructeurs d'abris (Derbernard, comm. personnelle, 2020).

3.2. Les hypothèses de durabilité associées à la mobilité du tunnel

La mobilité du tunnel est liée à plusieurs hypothèses de durabilité, qui suscitent l'intérêt des producteurs maraîchers. Celles-ci ne sont pas référencées dans la littérature scientifique en raison du caractère innovant du matériel. Le tunnel mobile fait d'ailleurs l'objet d'expérimentations en cours sur le territoire national.

a. Désintensifier les successions culturales sous abri

Le tunnel mobile, installé sur une surface linéaire comprenant au minimum deux zones consécutives, combine l'abri à des zones de plein champ. Le tunnel peut être déplacé sur les zones cultivées en fonction des besoins des cultures. Par exemple, il peut forcer le démarrage d'une culture sur une zone tandis que les autres zones accueillent des cultures de plein champ. C'est la conduite adoptée par E. Coleman (Coleman, 2009) et expérimenté par la Station Expérimentale du Rhône-Alpes (SERAIL) pour du maraîchage intensif sur petite surface. Dans ce cas, l'occupation du sol et la productivité sont identiques à celle d'une conduite maraîchère combinant les modes de production plein champ et sous abri. L'intérêt réside dans le découverture possible des zones. Il permet de poser l'hypothèse de valorisation des précipitations et de recharge en eau des sols. Le délai de retour des Solanacées et Cucurbitacées sur une même zone cultivée peut être allongé grâce à la disponibilité de plusieurs zones. Par exemple, si le tunnel mobile est installé sur trois zones, la tomate ne revient sur la même zone que tous les six ans. Dans une optique de désintensification maximale des successions culturales, le choix peut être fait de ne cultiver qu'une zone par an. Cela libère des périodes d'interculture sur les zones non cultivées, rendant envisageable l'intégration de CIMS. Dans ce cas, l'occupation du sol par une culture légumière et la productivité sont moindres mais des bénéfices environnementaux sont attendus.

b. Diversifier les successions culturales sous abri

Le tunnel mobile peut permettre d'inclure une ou plusieurs cultures supplémentaires dans le but de diversifier la succession culturelle sous abri. L'intégration de CIMS permet également de diversifier la succession par l'ajout d'espèces non légumières.

TABLEAU 3 : COMPARAISON DE TROIS OUTILS D'ÉVALUATION DE LA DURABILITE

Méthode d'évaluation	ACV	IDEA v3	DEXiPM-FV
Intégration de la durabilité	Durabilité environnementale	3 dimensions et 5 propriétés de l'exploitation agricole	3 dimensions
Echelle d'application	Filière ou produit	Systèmes de production	Systèmes de culture légumiers
Nombre de critères	6 impacts principaux renseignés par étape du cycle de vie	42 indicateurs	88 critères qualitatifs
Points forts	Standardisée ; Mise en évidence des transferts de pollution ; Complète pour la dimension environnementale	Accessible ; Indicateurs rapides à renseigner ; Utilisable en enseignement ; Approche systémique renforcée par une double approche évaluative	Rapide à renseigner ; Sorties graphiques lisibles ; Support de discussion ; Evaluation <i>ex-ante</i> possible
Limites	Incertitude des résultats ; Lourde à appliquer ; Seule la dimension environnementale est évaluée	Dimension agro-écologique peu adaptée à des systèmes spécialisés ; Pondération des indicateurs à dire d'experts	Indicateurs long à renseigner ou subjectifs ; Nombre important d'attributs d'entrée
Références	(van der Werf et al., 2011)	(Vilain, 1997; Zahm et al., 2019)	(Bohanec, 2008; Estorgues et al., 2017)

c. Échelonner les périodes de production

Grâce à son déplacement, le tunnel mobile peut permettre d'anticiper la mise en culture ou de prolonger les périodes de récolte. Il n'est plus obligatoire de détruire la culture en place avant d'implanter la suivante, sous abri, sur une autre zone. L'hypothèse est la suivante : le tunnel mobile permet d'échelonner les périodes de plantation/récolte. Par cet échelonnement, les producteurs peuvent valoriser leur production alors que l'offre est encore faible, entraînant un bénéfice économique supplémentaire. Toutefois, cette potentielle plus-value économique est à mettre en regard du coût d'achat du tunnel mobile.

d. Exposer les zones de culture aux conditions extérieures

Le sol, sous tunnel fixe, est couvert toute l'année en continu. Il est protégé des précipitations hivernales. L'eau contenue dans le sol, la Réserve Utile (RU), ne se remplit que par l'irrigation appliquée. En revanche, avec le découverture successif des zones cultivées permis par le tunnel mobile, les zones cultivées peuvent bénéficier des précipitations, qui rechargent la RU. Cela rend envisageable une réduction des apports en eau d'irrigation. Aussi, exposés à ces conditions, les matériaux de paillages plastiques peuvent être choisis biodégradables. En culture de plein champ, ces paillages sont enfouis après la fin de la culture et progressivement dégradés dans le sol. Sous tunnel fixe, ce type de paillage n'est pas utilisé car, sans l'exposition aux conditions extérieures, leur dégradation n'est pas garantie. Ils sont remplacés par des paillages en PE qui doivent être retirés en fin de culture. Cette opération impose un temps de travail supplémentaire, avec son coût économique. De plus, la filière de recyclage des paillages plastiques PE n'en permet pas encore le recyclage. L'utilisation de matériaux biodégradables dans le SdC innovant laisse entrevoir une hausse de durabilité environnementale. La réduction du temps de travail est à mettre en regard du coût des matériaux pour chiffrer un éventuel bénéfice économique.

3.3. Comment évaluer la durabilité d'un système innovant ?

La durabilité d'un tel système de culture est complexe à évaluer, par les multiples dimensions qu'elle couvre. Des méthodes d'évaluation intégrant cette multiplicité, dites méthodes d'évaluation multicritères, existent à différentes échelles (Tableau 3). L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est l'une d'entre elles, au même titre que les Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles (IDEA) ou l'outil DEXiPM-FV, mis au point par Bohanec (2008). De manière générale, ces méthodes s'appuient sur des critères qualitatifs, eux même renseignés par des indicateurs* de durabilité.

Un indicateur est défini comme une variable simple, reproductible et synthétique, mise en regard d'une référence (CIVAM, 2008). En maraîchage diversifié, une des difficultés réside dans la définition de cette référence. Actuellement, à l'échelle nationale, il n'existe pas de méthodes d'évaluation multicritères de la durabilité pour ces systèmes de culture mais le Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) PICLég travaille à l'adaptation du logiciel DEXi.

Les systèmes de culture maraîchers bio sous abri ont une durabilité limitée sur le long terme. Les dimensions environnementales et économiques sont fragiles alors qu'un levier, l'implantation de CIMS, est connu. Pour l'intégrer sans compromettre la rentabilité de la surface sous tunnel, une innovation a été développée : le tunnel mobile. Il apporte des hypothèses de durabilité, dont l'intérêt est évalué. Pour cela, un projet national est mené par la station expérimentale d'Auray.



FIGURE 7 : TOUTILO ET OZ, DEUX TECHNOLOGIES POUR REDUIRE LA PENIBILITE DES OPERATIONS MANUELLES (CREDITS PERSONNELS)

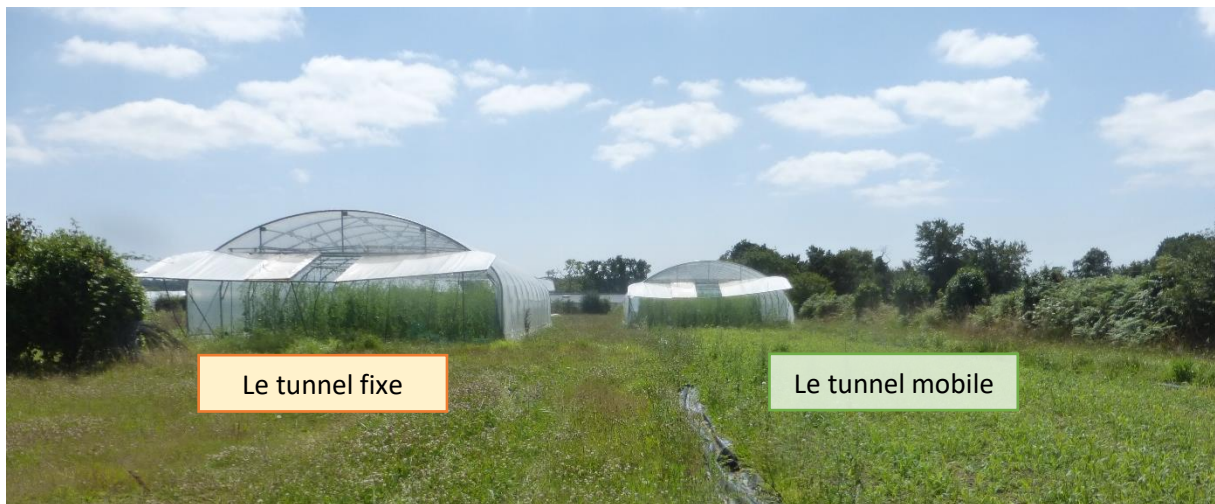


FIGURE 8 : LES TUNNELS FIXE ET MOBILE POUR TESTER LA DESINTENSIFICATION SOUS ABRI (CREDITS PERSONNELS)

1. Un projet national : « Vers plus de durabilité en maraîchage bio »

Face à la fragilité des systèmes maraîchers bio, un projet est né avec l'optique d'en accroître la durabilité. Ce projet national, intitulé « Vers plus de durabilité en maraîchage bio », est porté par la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB). Il bénéficie de différentes sources de financements : France Agri Mer, à hauteur de 70 %, le Conseil Régional de Bretagne à hauteur de 10 % tandis que les 20 % restants sont financés par la CRAB. Pour une durée de trois ans, de 2018 à 2021, le projet teste deux actions, chacune ciblant les trois piliers de la durabilité.

Action 1 : Réduire la pénibilité des opérations manuelles en cultures de plein champ à l'aide de nouvelles technologies : le cobot Toutilo et le robot autonome Oz 440

Il s'agit de comparer une conduite manuelle témoin à deux autres conduites : l'une assistée du cobot Toutilo, l'autre robotisée grâce au robot autonome Oz (Figure 7). Sur les trois années de projet, les variables d'études sont la pénibilité des tâches et le temps de travail. Cette action s'inscrit principalement dans les piliers économique (coût des technologies) et social (pénibilité et temps de travail) de la durabilité. Des partenariats sont établis avec les deux concepteurs des outils, les entreprises Touti'Terre (Toutilo) et Naïo technologies (Oz). La MSA Portes de Bretagne est également partenaire du projet pour observer et caractériser les gestes et postures lors des opérations culturales.

Action 2 : Désintensifier les systèmes de culture sous abri par l'intégration d'un matériel innovant : le tunnel mobile

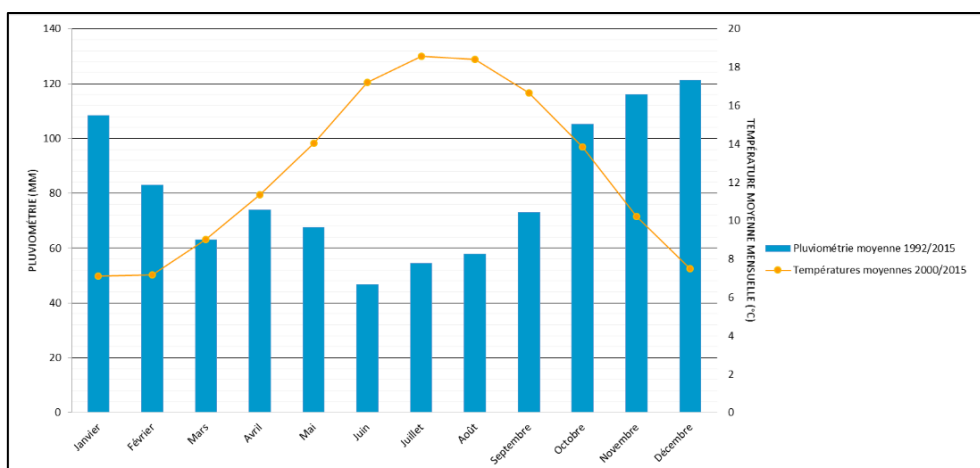
Dans cette action, il s'agit de comparer un système de culture (SdC) de référence, incluant un tunnel fixe, à un SdC innovant, incluant un tunnel mobile et une succession culturale repensée (Figure 8). Pour rappel, la problématique est la suivante : en quoi l'intégration d'un matériel innovant, tel que le tunnel mobile, peut-elle accroître la durabilité des systèmes maraîchers bio sous abri ? Les variables étudiées concernent la durabilité environnementale (conditions climatiques et consommation de ressources) et la durabilité économique (rentabilité du système). Un partenariat est établi avec le constructeur d'abris Debernard qui fournit les deux tunnels.

Les deux actions ont pu être suivies au cours de mon stage de fin d'études. Cependant, dans un souci de synthèse, seule la seconde action sera développée dans ce mémoire. Ce choix a été motivé dès le début de stage, en période de télétravail. En effet, l'action tunnel mobile étant menée depuis 2018, plusieurs données étaient déjà disponibles alors que l'action une a évolué cette année suite au progrès technologique des outils testés.

2. La station expérimentale d'Auray

2.1. Localisation géographique et historique

L'expérimentation est mise en place à la station expérimentale d'Auray, située route du Bono. Les coordonnées géographiques sont les suivantes : longitude : - 2,9695°, latitude : 47,6594° et altitude : 25 m. Créée en 1972, la station est aujourd'hui un site d'expérimentations en maraîchage diversifié. Plusieurs projets y sont menés sur des thématiques variées telles que l'utilisation de paillages biodégradables ou la conservation des potimarrons. Sur les quatre hectares disponibles, deux sont conduits en agriculture conventionnelle et deux en AB.



**FIGURE 9 : DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE DE LA STATION EXPERIMENTALE D'AURAY (56)
(DONNEES METEO FRANCE DE LA STATION)**



Données cartographiques : © Mégalis Bretagne

**FIGURE 10 : VUE AERIEENNE DE LA STATION EXPERIMENTALE ET DES DEUX PARCELLES ETUDIEES
(D'APRES LE SITE GEOPORTAIL)**

L'équipe, encadrée par Maët Le Lan, responsable de station, est composée de Marie Cordonnier, technicienne d'expérimentation, Christophe Le Meut et Christophe Girard, deux ouvriers spécialisés et d'un(e) assistant(e) à mi-temps. En saison, des stagiaires d'école et un employé saisonnier viennent compléter l'équipe.

2.2. Les conditions climatiques sur site

Auray est une commune du département du Morbihan, en Bretagne. Par sa proximité avec le Golfe du Morbihan, la ville bénéficie d'un climat océanique tempéré favorable aux cultures maraîchères. La Figure 9 reprend les moyennes climatiques relevées par la station Météo France du site entre 2000 et 2015. La température moyenne est de 12,5°C. Les mois d'hiver (décembre, janvier et février) sont les plus froids, avec une température moyenne de 7 °C, alors que la température maximale est atteinte au cours des mois de juillet et août. La pluviométrie annuelle s'élève à 970 mm entre 1992 et 2015.

2.3. Les caractéristiques physico-chimiques du sol des parcelles

Les parcelles choisies pour l'expérimentation sont nommées T5AB pour le SdC de référence et T4AB pour le SdC innovant (Figure 10). Elles étaient auparavant destinées à de la culture maraîchère de plein champ et conduites en AB. Le sol de ces parcelles est composé de 50 % de sable, 30 % de limons et 20 % d'argiles, correspondant, d'après le triangle des textures, à un sol argilo sablo-limoneux. La teneur en eau du sol s'élève à 1,80 mm d'eau par cm de terre fine. Pour une profondeur moyenne du sol estimée à 55 cm, la Réserve Utile (RU) calculée est d'environ 100 mm. Une analyse des composantes chimiques du sol (Annexe I), menée en 2018, a révélé un potentiel Hydrogène (pH) de 6,1, indiquant un sol légèrement acide mais correct pour des cultures maraîchères. La teneur relevée en matières organiques du sol est de 3,51 %.

Les conditions climatiques et caractéristiques physico-chimiques du sol font partie des conditions d'expérimentation et sont à garder en mémoire pour l'analyse des résultats.



**FIGURE 11 : PLAN DU SdC DE REFERENCE
(CREDITS PERSONNELS)**



**FIGURE 12 : SUCCESSION CULTURALE ETABIE POUR LE SdC DE REFERENCE
(CREDITS PERSONNELS)**



**FIGURE 13 : ELEMENTS DE MOBILITE (GAUCHE) ET AMARRES A PERCUSSION (DROITE) DU TUNNEL MOBILE
(CREDITS PERSONNELS)**

1. Le système de culture de référence correspondant à une pratique maraîchère

1.1. L'abri de référence : le tunnel fixe

Le SdC de référence inclut un tunnel fixe. Il regroupe les caractéristiques des tunnels installés chez les maraîchers et couvre une surface totale de 156 m² (Figure 11). La structure du tunnel est formée par dix arceaux à pieds droits, ancrés dans le sol par des vrilles enterrées à 80 cm de profondeur. Ces arceaux sont en tube d'acier galvanisé de 40 mm de diamètre. Sur cette structure repose une bâche en PE de 200 µ, incolore et traitée anti-UV. Pour limiter la prise au vent du tunnel, la bâche est enterrée à 30 cm de profondeur sur toute la longueur du tunnel. Deux ouvrants avec portes basculantes, de part et d'autres du tunnel, en permettent la ventilation. Ce tunnel est commercialisé par le constructeur partenaire à un coût de 22 €/m².

1.2. La succession culturale imposant une couverture permanente du sol

La succession culturale de ce système reflète une pratique maraîchère du secteur, reposant sur une alternance des Solanacées et Cucurbitacées un an sur deux. Elle compte six espèces légumières qui sont la tomate, la laitue, la carotte, le concombre, la blette et la pomme de terre. Les espèces, variétés et distributeurs sont indiqués en Annexe II. En trois ans, huit périodes de culture se succèdent selon le calendrier maraîcher d'une conduite sous abri (Figure 12). Il impose un enchaînement rapide des cultures : la culture en place est obligatoirement détruite avant l'implantation de la suivante, quelques jours plus tard. De fait, la succession est continue et l'occupation du sol permanente. Comme vu en Partie I, cette intensité fragilise la durabilité du système.

Pour le projet, ce SdC de référence est comparé à un SdC innovant. Il repose sur un tunnel similaire rendu mobile grâce à des adaptations techniques.

2. Le SdC innovant : un pilotage ambitieux pour accroître la durabilité

2.1. L'abri innovant : le tunnel mobile de la société Debernard

Le SdC innovant intègre un tunnel mobile, dont les dimensions sont identiques à celles du tunnel fixe. La bâche et les matériaux utilisés sont également identiques au tunnel fixe. La mobilité du tunnel est permise grâce à des rails tubulaires, en acier galvanisé, sur lesquels circulent des roues à gorge, installées à la base de chaque arceau (Figure 13). Lors de la conception de ce tunnel, plusieurs critères ont été pris en compte par le constructeur Debernard. Le premier concernait la facilité de déplacement. Ainsi, le déplacement doit pouvoir s'effectuer sans outils de traction mais manuellement, par deux personnes, en moins d'une heure (Debernard, comm. personnelle, 2020). Préalablement au déplacement, les points d'ancrage du tunnel sont retirés et les deux ouvrants sont maintenus en position ouverte. Cette opération fait l'objet d'observations au sein de l'expérimentation (temps de travaux et observation de la pénibilité).

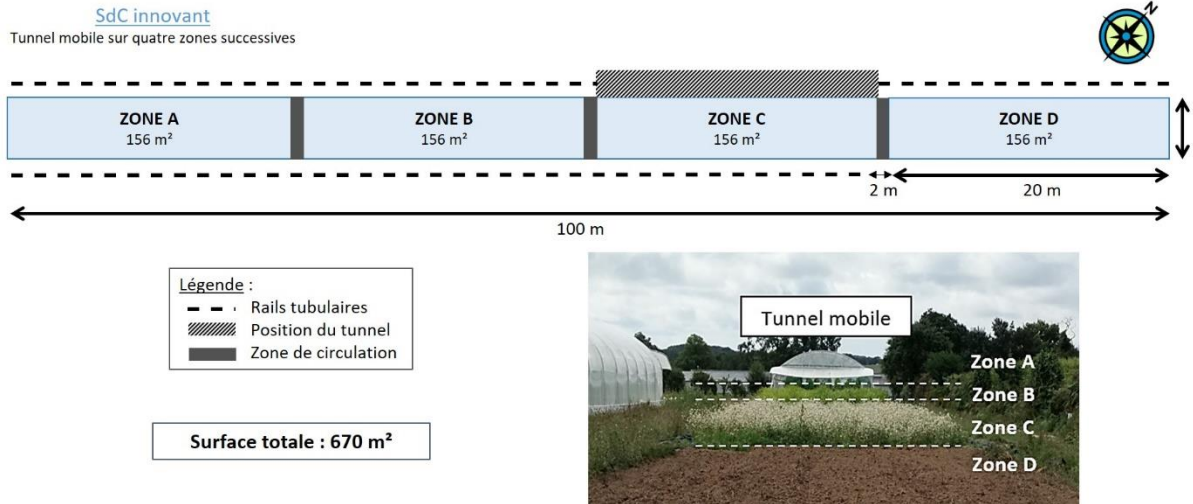


FIGURE 14 : PLAN DU SdC INNOVANT
(CREDITS PERSONNELS)

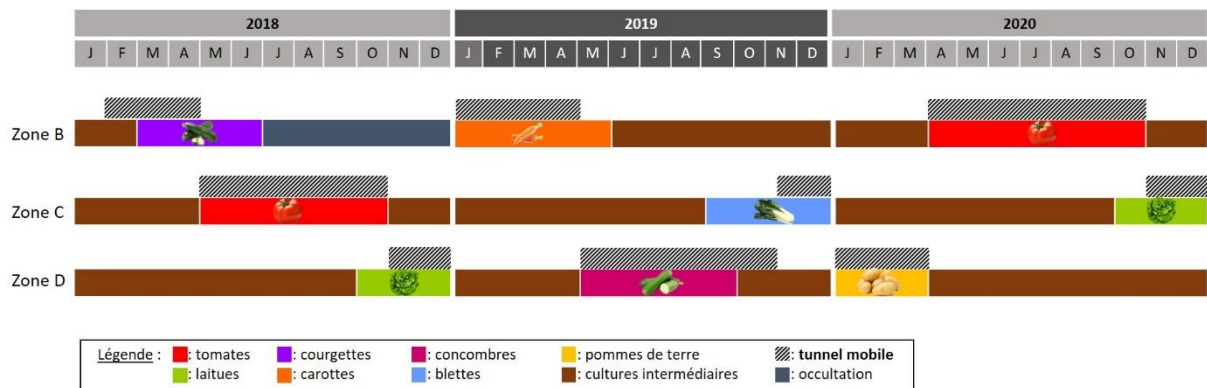


FIGURE 15 : SUCCESSION CULTURALE ETABLIE SUR TROIS ZONES POUR LE SdC INNOVANT
(CREDITS PERSONNELS)

L'autre critère réside dans la rigidité de la structure. Pour s'en assurer, des renforts latéraux sont installés en bas de la structure et des croix de contreventements ajoutées en entrée et sortie de tunnel. La fixation du tunnel sur zone est assurée par des amarres à percussion (Figure 13). Il reste toutefois un espace entre le rail, posé sur le sol, et la bâche de couverture. Pour limiter la prise au vent du tunnel, le constructeur préconise de lester la bâche. A ces deux critères s'ajoutait celui du coût, imposé par l'équipe de la station. Le coût pour le tunnel mobile ne devait pas excéder le double de celui du tunnel fixe. En incluant les rails et roulettes nécessaires à la mobilité du tunnel ainsi que les renforts de la structure, le coût d'achat constructeur s'élève à 32 €/m².

Le projet, d'une durée de trois ans, incluait trois zones pour le SdC innovant. Toutefois, lors de la préparation de la parcelle expérimentale, une quatrième zone a pu être dégagée. La surface consacrée au SdC innovant compte ainsi quatre zones successives de 156 m², entre lesquelles est laissée une zone tampon de 15,6 m² pour faciliter la circulation, soit une surface totale de 670 m² linéaires (Figure 14).

2.2. Une succession culturale reposant sur la mobilité du tunnel

Au démarrage du projet, la succession culturale du SdC innovant a été réfléchié selon les hypothèses de durabilité évoquées en bibliographie. Pour correspondre à la durée du projet, elle a été pensée sur trois ans et trois zones. Les itinéraires techniques et cultureux réalisés, par culture et par système, sont détaillés en Annexe III.

a. Désintensifier la succession culturale sous abri

Le pilotage innovant reprend l'hypothèse de désintensification : une seule culture légumière est implantée par zone par an. Pour préserver l'intérêt de l'abri, des cultures d'été à fortes valeurs ajoutées sont implantées. En 2018, une tomate est implantée en zone C. Un concombre est implanté en zone D en 2019 alors qu'une seconde culture de tomates est implantée en 2020, en zone B (Figure 15).

b. Diversifier la succession culturale sous abri

La mobilité du tunnel permet d'ajouter une culture supplémentaire de courgette en début de succession. De fait, la succession comprend les mêmes espèces légumières que le SdC de référence mais ajoute la courgette, comptant ainsi sept espèces et neuf périodes de culture (Figure 15).

Lorsque les zones ne sont pas cultivées, il est convenu que des cultures intermédiaires multiservices sont implantées. Six espèces sont choisies : l'avoine (*Avena sativa*), le trèfle (*Trifolium incarnatum*), la féverole (*Vicia faba*), la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*), le sarrasin (*Fagopyrum tataricum*) et le sorgho (*Sorghum sudane*). Le choix de l'espèce implantée est discuté et arrêté en cours de projet selon la période et la durée de l'interculture. Les légumineuses sont associées à l'avoine en mélange d'espèces. L'avoine et le trèfle incarnat sont par exemple associés au semis dans des proportions respectives de 50 kg/ha et 15 kg/ha. Ces cultures sont semées à la volée puis enfouies sur place avant l'implantation de la culture légumière.

Lorsqu'il s'agit d'engrais verts, comme le trèfle ou la féverole, l'intégration de CIMS permet de revoir le pilotage de la fertilisation. Il est réalisé selon le principe suivant : apporter autant ou moins que dans le SdC de référence. Pour cela, la méthode du bilan azoté est utilisée. Des reliquats azotés sont réalisés avant l'implantation de chaque culture dans les deux systèmes. Si l'azote disponible dans le sol est plus important dans le SdC de référence, un apport d'intrants azotés peut être réalisé dans le SdC innovant. La quantité apportée est soit complémentaire à l'azote déjà disponible dans le sol, soit, au maximum, identique à celle apportée dans le SdC de référence.

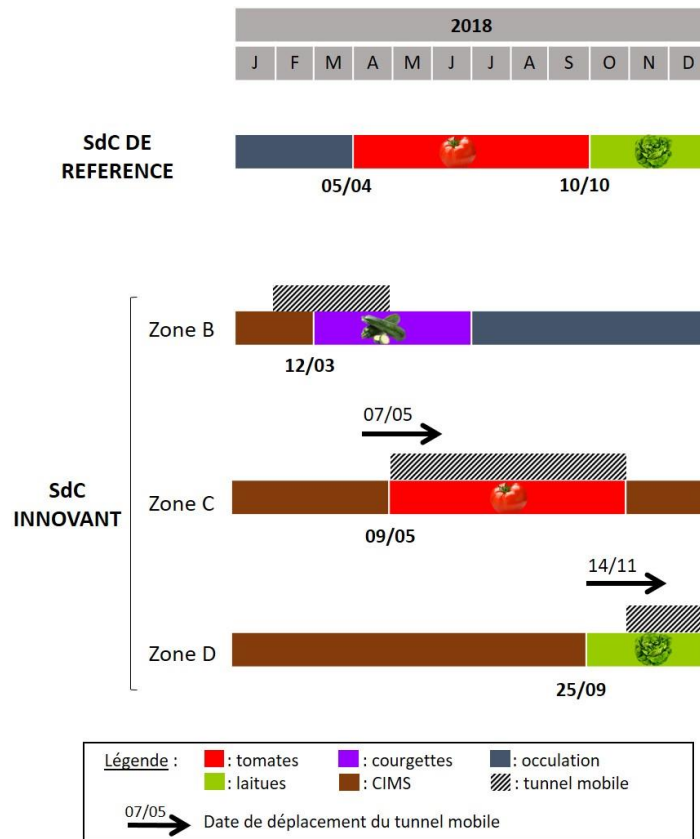


FIGURE 16 : ZOOM SUR LES DATES D'IMPLANTATION ET DESTRUCTION DES CULTURES EN 2018 (CREDITS PERSONNELS)

La courgette est implantée uniquement dans le SdC innovant. Elle retarde d'un mois la plantation des tomates sous le tunnel mobile. En revanche, la laitue est implantée un mois plus tôt dans le SdC innovant, conformément au principe d'anticipation de la mise en culture.



FIGURE 17 : VUE INTERIEURE DU TUNNEL FIXE LE 29/04/2020 (CREDITS PERSONNELS)

c. Échelonner les périodes de production

La possibilité de laisser la culture en place sur une zone avant la mise en culture de la suivante, sur une autre zone, est exploitée lors du pilotage. Dès que possible, la mise en culture est anticipée dans le SdC innovant par rapport au SdC de référence. Une exception réside dans la date de plantation de la tomate en 2018.

En effet, cette culture nécessite la présence du tunnel sur lequel est fixé le support de culture. Or, en début de projet, une culture de courgettes est incluse à la succession culturale. Elle est implantée en mars 2018 en zone B, puis découverte fin avril (Figure 16). Le tunnel mobile est déplacé de la zone B à la zone C, qui reçoit les tomates, ne permettant pas d'anticiper la plantation. Les tomates des deux systèmes sont plantées avec un mois de décalage. A l'anticipation des dates de mise en culture s'ajoute le prolongement des périodes de récolte. Dans le SdC innovant, la culture est par principe laissée en place plus longtemps que dans le SdC de référence.

Le SdC innovant repose sur un tunnel rendu mobile grâce à des rails et roues à gorge. La mobilité du tunnel permet d'envisager plusieurs hypothèses de durabilité. Elles sont exploitées par la succession culturale établie, qui se veut désintensifiée, diversifiée et plus souple dans le calendrier cultural. Cette succession et son pilotage innovant ont des conséquences sur la durabilité environnementale du système.

3. Les variables d'étude de la culture de tomates pour la saison 2020

Au cours de ma période de terrain, j'ai pu mettre en place un suivi de croissance sur la culture d'été de 2020 : la tomate, de variété Cauralina (Gautier semences). Un zoom à l'échelle de cette culture est réalisé par l'étude de trois variables, relevées en cours de cycle cultural. En août 2020, la culture est toujours en place.

La tomate est plantée sur trois planches de 39 m², sur paillage plastique, à une densité d'un plant tous les 50 cm, soit 72 plants par planche (Figure 17). La quatrième planche du tunnel fait l'objet d'un essai de diversification variétale et n'est pas prise en compte pour ces mesures. Les opérations culturales sont modulées d'un système à l'autre en fonction de la vigueur des plants.

3.1. Les rendements moyens par date de récolte

Une variable calculée de rendement commercialisable (kg/m²) est utilisée pour comparer la production dégagée sur trois planches des deux systèmes. Pour le calcul, le poids commercialisable (kg) est relevé à chaque date de récolte, par planche. Ce poids est ramené à la surface de la planche pour obtenir une valeur de rendement (kg/m²). Les rendements des trois planches sont ensuite moyennés pour estimer le rendement moyen du tunnel par date de récolte.

3.2. Le suivi de croissance

Sur ma période de terrain, une mesure complémentaire de suivi de croissance a été mise en œuvre sur la tomate. Ce suivi aurait pu débuter dès le mois de mai mais le confinement a contraint la mise en place de ce protocole. Le suivi s'est donc fait entre juin et août 2020. Les feuilles de notation sont disponibles en Annexe IV. Cette mesure est à la fois un outil de pilotage en cours de culture, car elle permet de quantifier une perte de vigueur observée, et une variable explicative *a posteriori* du rendement. Cette dernière fonction est étudiée ici.

TABLEAU 4 : VARIABLES ETUDIÉES A L'ÉCHELLE DES SYSTEMES

Piliers de durabilité	Evaluation des ...	Variable d'étude	Méthode de mesure / calcul	Fréquence de mesure	Unité
Durabilité économique	Rendements par culture	Rendement commercialisable	Poids (kg) récolté par unité de surface (m ²)	Par culture	kg/m ²
		Échelonnement des périodes de production	Relevé des dates de récolte	Par culture	Semaine
Durabilité environnementale et économique	Consommation en intrants azotés	Azote apporté par les intrants	Quantité apportée x proportion d'azote total x coefficient d'efficacité	Bilan final	kg N/ha
		Restitution d'azote des cultures intermédiaires	Mesure de biomasse verte → outil MERCI	Par couvert	kg N/ha
Durabilité environnementale	Consommation en eau d'irrigation	Apports en eau d'irrigation	Relevés de compteurs d'irrigation	Par culture	mm
		Pluviométrie valorisée	Station météo Sencrop	Par jour	mm
Durabilité économique	Temps de travaux	Temps de travaux totaux par type d'activité	Temps par activité (min) x nombre de personnes impliquées	Par opération culturale	min
Durabilité économique	Produits totaux	Vente des légumes	Prix hebdomadaire (€/kg) x quantité commercialisable de la semaine (kg)	Bilan final	€
	Charges totales	Six postes de charges	Prix unitaire x quantité utilisée dans le système	Bilan final	€

TABLEAU 5 : COMPOSITION DES ENGRAIS ORGANIQUES DU COMMERCE UTILISES

	Amendement Arvor compost (g/kg)	Engrais Humibio 7-5-7 (%)
Azote organique total (N)	14,1	7,0
Anhydride phosphorique (P ₂ O ₅)	7,4	5,0
Oxyde de potassium (K ₂ O)	1,2	7,0
Calcium (CaO)	4,0	-
Oxyde de magnésium (MgO)	-	3,0
Coefficient d'efficacité en valeur absolue	0,6	1,0

Pour chaque système, trois plantes, une par planche, sont identifiées dans le tunnel. La hauteur totale, en cm, de chacune est mesurée à l'aide d'un décimètre. Par la suite, la croissance hebdomadaire (cm) est mesurée chaque semaine. Deux autres paramètres sont mesurés : la longueur (cm) d'une feuille, à 30 cm de la tête du plant, et, au même niveau, le diamètre de la tige (mm), mesuré au pied à coulisse. Ces relevés sont effectués tous les mercredis entre les semaines 23 (03/06/2020) et 33 (12/08/2020), soit sur une période totale de dix semaines. L'objectif est de comparer la vigueur des plantes, par corrélation entre les trois paramètres, selon le système.

3.3. Les températures journalières moyennes du sol sous abri

La température du sol (°C) sous abri est relevée en continu, heure par heure, par une sonde Tinytag. Deux électrodes sont plantées à 15 cm de profondeur, à 1 m l'une de l'autre, au milieu d'une des planches centrales des tunnels. Les données sont extraites sous forme de fichier Excel puis analysées. Une température moyenne par heure est d'abord calculée, puis moyennée pour obtenir la température journalière moyenne (°C). Ces relevés sont réalisés pour toutes les cultures des deux systèmes. Ayant suivi le cycle cultural de la tomate de 2020, seuls les résultats sur cette culture sont présentés.

La température est analysée sur une période allant de la date de plantation et de déplacement du tunnel mobile, le 03 avril, au 20 juillet 2020, date d'extraction des données. Pour le SdC de référence, l'implantation des tomates est plus tardive (09/04). Les températures du sol sous abri comprennent trois jours, du 03 au 06 avril, où la culture précédente de pomme de terre (P.d.T) est en place puis, trois jours entre l'arrachage des P.d.T, le 06 avril, et l'implantation des tomates, le 09 avril 2020.

3.4. Le traitement des données « culture »

Les données sont collectées au cours du cycle cultural de la tomate et saisies sur Excel. Exprimées en fonction du temps, les variables sont représentées sous forme de courbes en respectant le code couleur suivant : le SdC de référence est indiqué en orange, le SdC innovant en vert.

4. Les variables de comparaison des deux systèmes

Les variables étudiées pour cette approche système sont synthétisées dans le Tableau 4. Les données ont été collectées depuis 2018, pour les deux SdC et sur l'ensemble des cultures. Il ne manque au bilan que la dernière culture de laitues Batavia, dont la plantation est prévue fin septembre 2020.

4.1. Les consommations totales en intrants azotés et eau d'irrigation

Les consommations en intrants azotés et eau d'irrigation sont analysés comme indicateur de durabilité environnementale. Ces deux variables sont représentées graphiquement sous forme de diagramme en barres.

La quantité totale d'azote fournie (kg N/ha) est calculée pour les deux SdC. Le calcul est réalisé en fonction du type d'apport et de la quantité apportée, exprimée en t/ha. Un coefficient d'efficacité est pris en compte (Tableau 5). La quantité totale d'azote apportée par les intrants peut être estimée, par culture et au total. Parallèlement, dans le SdC innovant, la biomasse verte des CIMS est mesurée à l'aide d'un quadrat d'1 m², disposé à trois reprises sur la zone de 156 m². Pour chacun, la totalité du couvert est prélevée puis pesée de manière à obtenir une valeur moyenne de biomasse verte, en g/m². Cette biomasse est ensuite renseignée dans l'outil MERCI, qui la converti en quantité d'azote disponible (kg N/ha). Cette quantité est ajoutée à celle fournie par les intrants azotés, lorsqu'il y en a, de manière à obtenir une quantité totale d'azote (kg N/ha) fournie pour le SdC innovant.

Pour comparer la consommation en eau d'irrigation des deux systèmes, des compteurs sont installés à l'entrée de chaque tunnel. La quantité d'eau d'irrigation (mm) est ainsi relevée et suivie de manière hebdomadaire en 2018 et 2019 puis quotidiennement en 2020. Les pluviométries quotidiennes (mm) sont relevées par une station météo Sencrop. Elles sont totalisées par culture selon les dates de déplacement du tunnel. Par addition, la quantité totale d'eau (mm) par système est calculée.

4.2. Les rendements commercialisables par culture

Une variable de rendement commercialisable (kg/m²) est utilisée pour comparer la production des deux systèmes. Ce rendement est calculé par culture, en divisant le poids commercialisable récolté total (kg) par la surface cultivée, soit 156 m². A titre indicatif, un rendement de référence local est ajouté d'après le guide *Cultures maraîchères dans le Morbihan* (Calmet & Le Lan, 2019). Les rendements moyens du SdC innovant par culture sont aussi exprimés en pourcentage de ceux du SdC de référence. Cette conversion souligne l'importance des pertes ou gains de rendement pour le SdC innovant.

Pour expliquer ces trois variables, l'échelonnement des périodes de production est décrit. Il est fonction de la succession culturale établie (Partie III, 2.2).

4.3. Les temps de travaux

Les temps de travaux, à la minute près, ainsi que le nombre de personnes impliquées sont notés pour chaque opération culturale réalisée, par système. Le temps total, en minutes, est obtenu par multiplication. Il est intégré au pilier économique de la durabilité, bien qu'il intègre aussi le pilier social en termes de charge de travail. Par soucis de simplification, sept types d'opérations sont définis : travail du sol, fertilisation, semis/plantation, entretien de la culture, protection de celle-ci et fin de culture. Le déplacement du tunnel mobile, qui est une opération à part entière du SdC innovant, est comptabilisé. Pour ce système, les opérations liées à l'intégration des cultures intermédiaires sont incluses au temps de fertilisation. Les temps de récolte ne sont pas pris en compte dans cette analyse comparative car ils ne sont pas tous relevés et dépendent du rendement.

4.4. Le traitement des données « système »

Les données sont saisies sur tableurs Excel et les représentations graphiques réalisées avec le même outil. Le code couleur précédent est repris pour les deux systèmes. Les résultats par variables sont exprimés à l'échelle du système. Ils ne sont pas ramenés à une unité de surface occupée (156 m² versus 4 x 156 m²) pour ne pas avantager ou désavantager le SdC innovant. Par exemple, si les unités d'azote totales apportées étaient ramenées à la surface du SdC innovant, soit 624 m², la consommation serait diluée. L'absence de répétitions des systèmes ne permet pas de tester statistiquement les résultats.

Un bilan économique complète la comparaison des deux systèmes pour répondre à la question suivante : malgré les hypothèses en termes de durabilité environnementale avancées par le tunnel mobile, le SdC innovant est-il économiquement rentable pour les maraîchers ?

5. Bilan économique : comparaison produits et charges des deux systèmes

Il s'agit d'évaluer la rentabilité, comme indicateur de durabilité économique, du système innovant par rapport au SdC de référence. La comparaison est basée sur le calcul des produits d'exploitation dégagés et des charges engendrées par les deux SdC.

TABLEAU 6 : POSTES DE CHARGES DU BILAN ECONOMIQUE

Poste de charges	Descriptif
Charges de matériel	Coût d'achat des tunnels (Debernard), amorti sur dix ans selon un taux linéaire
Charges plants et semences	Plants légumiers (BioSem) Semences des cultures intermédiaires (AgroBioPinault)
Achats d'intrants azotés	Humibio 7-5-7 (Genetic Distribution) Arvor compost (Arvor compost)
Charges d'entretien de la culture	Paillages plastiques (CAMN) Ficelles support de culture (CAMN) Bâche d'occultation dans le SdC innovant (CAMN)
Charges de protection de la culture	Achat d'auxiliaires de culture (Biobest & Koppert) Traitements phytosanitaires (CAMN)
Coût du travail	Temps de travaux totaux, hors temps de récolte et temps de montage du tunnel, rapporté au SMIC : 10,15 €/h brut en août 2020.

TABLEAU 7 : MONTANTS DES ANNUITES DES DEUX TUNNELS

	SdC de référence	SdC innovant
Montant total HT (€) à l'achat	3 464,10	5 136,80
Montant d'une annuité (€) pour un amortissement linéaire sur dix ans	346,41	513,68
Total des annuités (€) pour les trois ans de projet	1 039,23	1 541,04

5.1. Le poste de produits d'exploitation : la vente des légumes

Les produits proviennent de la vente de légumes. Par choix, la totalité de la production récoltée est considérée comme vendue. La perte liée aux délais de conservation entre la récolte et la vente n'est pas chiffrée car elle serait variable selon la semaine de commercialisation et complexifierait l'étude économique. Les chiffres d'affaires (CA) calculés sont donc surestimés. Les quantités totales de légumes produites par semaine sont calculées. Pour prendre en compte l'allongement des périodes de production du SdC innovant, les fluctuations hebdomadaires des prix de vente sont prises en compte selon les dates de récoltes indiquées pour chaque culture. Les prix de vente sont ceux du Marché d'Intérêt National (MIN) Bio-Nantes, indiqués sur le site internet des Réseaux des Nouvelles des Marchés (RNM). Le chiffre d'affaires total (€) dégagé par culture est calculé, puis sommé pour obtenir le chiffre d'affaires total (€) par système.

5.2. Les six postes de charges

Les charges sont répertoriées selon six postes (Tableau 6). Les coûts d'achat des tunnels sont amortis sur dix ans de manière linéaire. Pour correspondre à la durée du projet, les montants de trois annuités sont sommés dans les charges de matériel (Tableau 7). Des différences sont attendues sur les charges d'entretien des cultures, du fait de l'utilisation de matériaux biodégradables dans le SdC innovant, et sur les charges de plants et semences en raison de l'implantation de la courgette et des cultures intermédiaires. L'eau d'irrigation n'est pas incluse aux charges. Elle provient d'une retenue d'eau collinaire et n'est pas prélevée sur le réseau. Le matériel d'irrigation (goutte à goutte, asperseurs) est identique dans les deux systèmes donc les coûts associés ne sont pas comptabilisés. Les dépenses engagées pour les différents achats sont ramenées aux conditionnements, de manière à obtenir le coût unitaire hors taxe. Seules les quantités réellement utilisées pour les deux systèmes sont comptabilisées.

5.3. Le traitement des données économiques

Pour l'approche économique, les charges et produits sont d'abord exprimés en euros par système. Une différence est calculée, exprimée en fonction du SdC de référence ($SdC_i - SdC_{ref}$). Ensuite, les valeurs sont ramenées à la surface du système : 156 m² pour le SdC de référence alors qu'il faut quadrupler cette surface pour obtenir la surface totale du SdC innovant (624 m²).

6. L'évaluation de la durabilité du SdC innovant

L'ensemble de ces résultats est lié à la durabilité globale des deux systèmes. Les quantités de production totale (kg) des deux SdC sont préférées aux rendements pour renseigner la productivité liée à la durabilité économique. Un tableau de synthèse est réalisé, indiquant les principaux résultats pour chaque variable « système » et leur effet sur le pilier de la durabilité concerné. Cet effet est représenté par trois symboles : = si la variable n'influe pas sur la durabilité, + si l'effet est positif, dans le cas d'une économie réalisée par exemple, ou, à l'inverse - si l'effet est négatif.

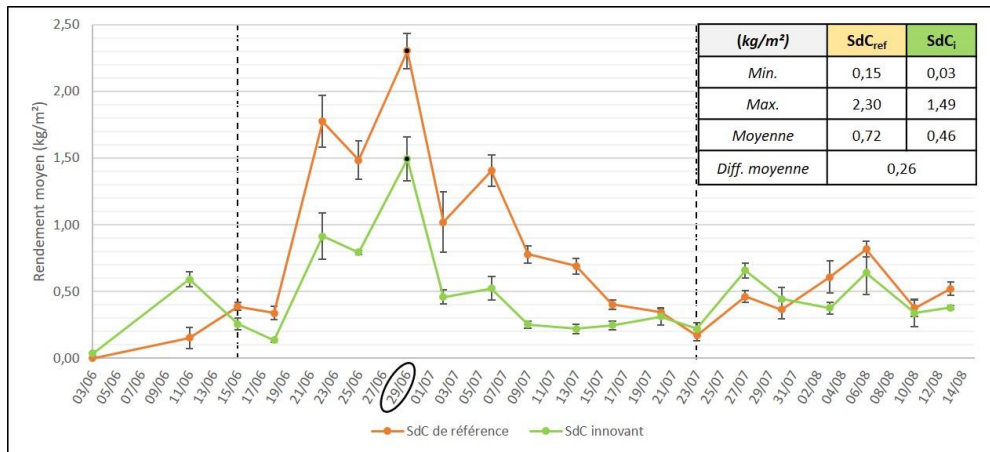


FIGURE 18: EVOLUTION DES RENDEMENTS MOYENS DE LA TOMATE PAR DATE DE RECOLTE

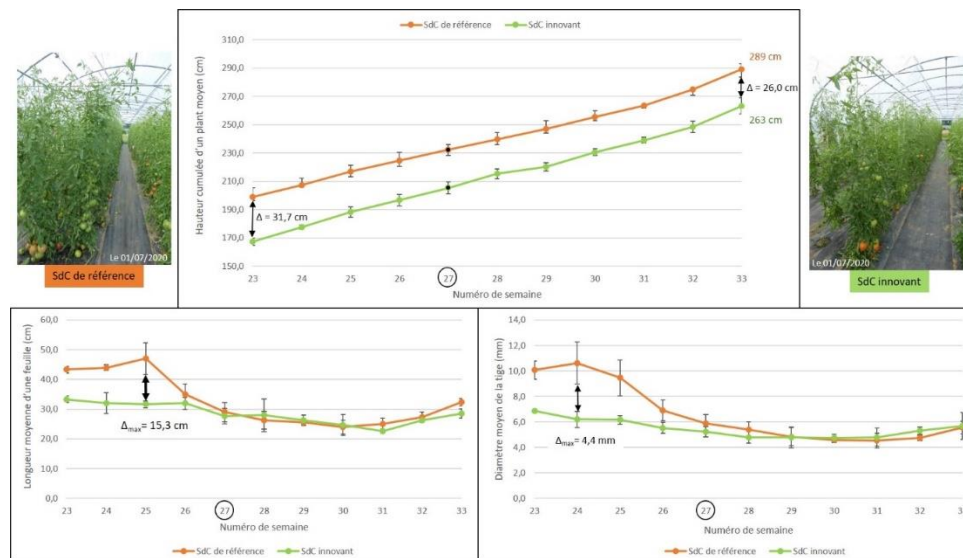


FIGURE 19 : COURBES D'EVOLUTION DES PARAMETRES DU SUIVI DE CROISSANCE SUR TOMATES

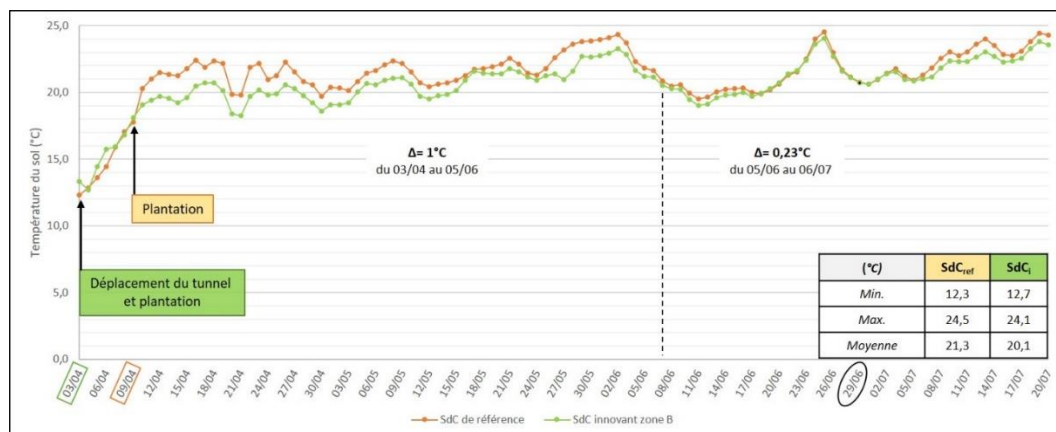


FIGURE 20 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DU SOL SOUS ABRI

PARTIE IV : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

1. L'étude de la culture de tomates pour la saison 2020

1.1. Les rendements moyens par date de récolte

La Figure 18 ci-contre représente l'évolution du rendement moyen (kg/m^2) en fonction des dates de récolte pour les deux systèmes. A la mi-août, le rendement moyen cumulé atteint 14 kg/m^2 pour le SdC de référence contre 9 kg/m^2 pour le SdC innovant. Pour les deux systèmes, le rendement maximal est atteint le 29 juin. Il s'élève à $2,3 \text{ kg/m}^2$ pour le SdC de référence contre $1,5 \text{ kg/m}^2$ pour le SdC innovant, soit une différence de 65 %. Malgré une allure générale similaire des deux courbes, trois périodes se distinguent. Le SdC innovant entre en récolte le 03 juin, une semaine avant le SdC de référence, le 11 juin. Jusqu'au 15 juin, le SdC innovant a un rendement moyen supérieur à celui du SdC de référence. Ensuite, du 15 juin au 23 juillet, soit sur environ un mois, le rendement moyen du SdC de référence est supérieur pour chaque date de récolte. Enfin, après le 23 juillet, les deux rendements prennent une valeur approximative de $0,5 \text{ kg/m}^2$. Fin août, les cultures de tomates sont encore en place. Les rendements cumulés ne se sont donc pas définitifs et plusieurs hypothèses sont envisageables quant à leurs évolutions.

1.2. Le suivi de croissance

Les trois paramètres de cette variable sont représentés graphiquement en Figure 19. La semaine 27 est entourée sur chacun des graphiques. Elle correspond à la date du rendement moyen maximal (29/06).

L'évolution de la hauteur des plants des deux systèmes suit la même tendance sur les dix semaines de suivi, avec une différence régulière. Pour les paramètres longueur moyenne d'une feuille et diamètre moyen de la tige, les valeurs du SdC de référence sont supérieures à celles du SdC innovant jusqu'à la semaine 27. Ces observations soulignent une différence de vigueur entre les deux systèmes. Plus vigoureux, les plants du SdC de référence ont pu soutenir la formation des premiers bouquets et assurer un rendement supérieur. Notons que la différence observée entre les plants des deux systèmes en semaine 23 est déjà marquée. Le décrochage des plants du SdC innovant a eu lieu plus tôt dans la saison et n'est pas visible sur ces représentations. Cette différence de vigueur peut être liée à la température journalière moyenne du sol sous abri.

1.3. Les températures journalières moyennes du sol sous abri

La Figure 20 présente l'évolution de la température moyenne journalière du sol ($^{\circ}\text{C}$) sous abri pour les deux SdC. La tendance des deux courbes est similaire : sur la période étudiée, le sol du SdC innovant est plus froid que celui du SdC de référence. A la date de plantation, le sol a une température d'environ 12°C pour le SdC innovant, contre environ 18°C pour le SdC de référence. Les plants de tomates bénéficient d'un sol plus chaud au démarrage dans le SdC de référence. La température maximale du sol est atteinte à la même date pour les deux SdC, le 25 juin. La différence s'élève alors à $0,47^{\circ}\text{C}$. Cette température maximale est atteinte quatre jours avant la date de récolte (29/06) où le rendement moyen est maximal.

L'ensemble de ces résultats est corrélé à l'échelonnement des périodes de production à l'échelle du système (Partie IV, 2.3).

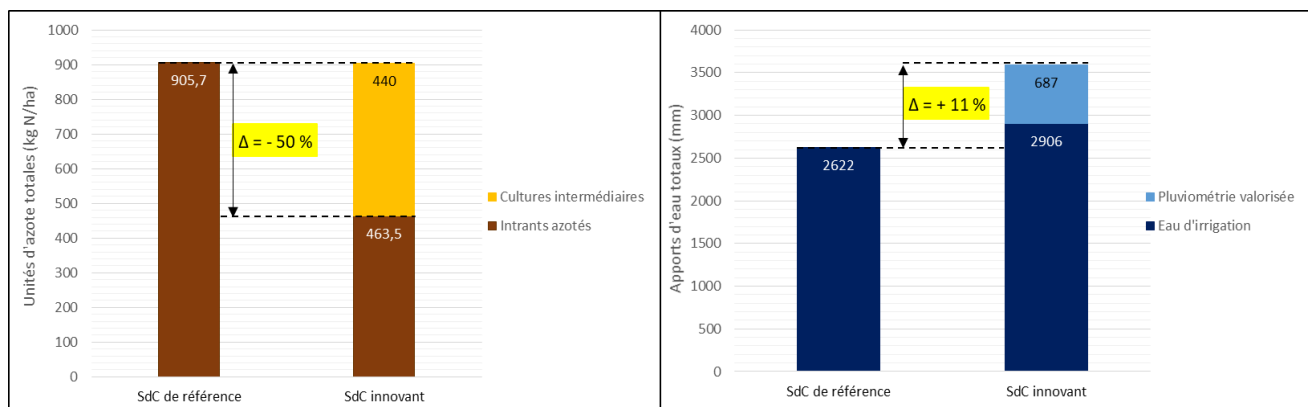


FIGURE 21 : CONSOMMATIONS TOTALES EN INTRANTS AZOTES ET EAU D'IRRIGATION POUR LES DEUX SdC

TABLEAU 8 : RENDEMENTS MOYENS DES DEUX SdC

Année	Culture	Rendement de référence* (kg/m ²)	SdC de référence	SdC innovant	Différence de rendement SdC _i -SdC _{ref} (kg/m ²)
			Rendement moyen (kg/m ²)	Rendement moyen (kg/m ²)	
2018	Courgette	2 à 4	-	3,81	-
	Tomate	6 à 15	16,64	11,88	-4,75
	Laitue**	6 à 10	10,88	10,75	< 1
2019	Carotte	1,5 à 3	3,10	3,59	0,49
	Concombre	8 à 10	4,38	9,30	4,92
	Blette	1,5 à 4	1,10	2,61	1,51
2020	P.d.T	1,5 à 2,5	1,74	0,72	-1,02
	Tomate	6 à 15	12,87	8,47	-4,40

* : D'après le Calendrier des cultures maraîchères (Calmet & Le Lan, 2019)

** : Rendements exprimés en nombre de têtes/m²

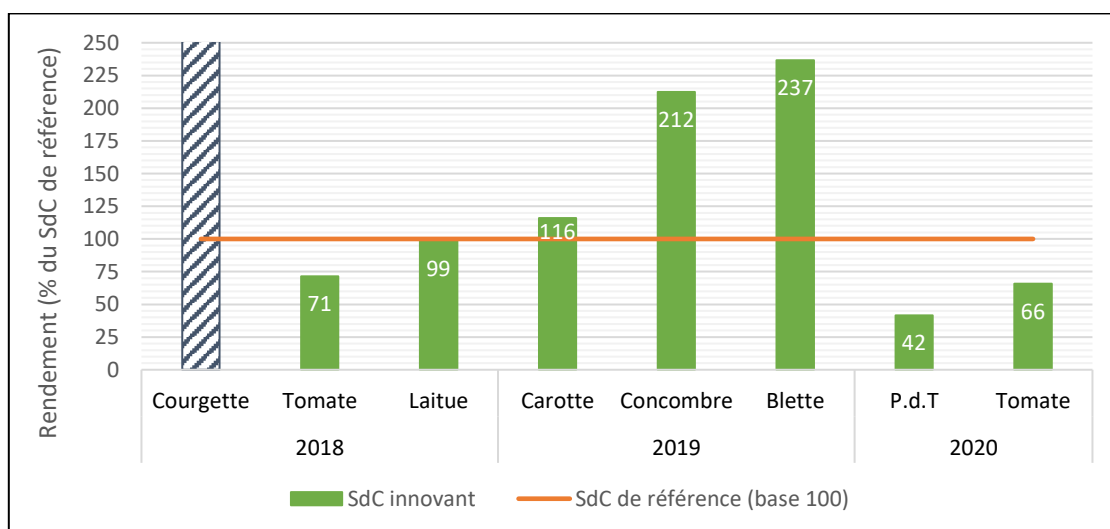


FIGURE 22 : DIAGRAMME EN BARRES DU RENDEMENT MOYEN DU SdC INNOVANT EN % DU SdC DE REFERENCE

2. L'évaluation des conséquences du pilotage innovant

2.1. Les consommations totales en intrants azotés et en eau d'irrigation

Les apports totaux en azote (kg N/ha) sont repris par culture en Annexe V et par système en Figure 21. Par rapport au SdC de référence, les unités apportées par intrants azotés dans le SdC innovant sont toujours inférieures, conformément au principe de pilotage établi. Le pourcentage d'économie total s'élève à 49 %. L'intégration des cultures intermédiaires et leur restitution estimée d'azote fournissent des unités supplémentaires. Cet apport complémentaire permet d'atteindre une fourniture d'azote équivalente à celle du SdC de référence.

Avec une approche système, la quantité d'eau d'irrigation totale est plus élevée dans le SdC innovant que dans le SdC de référence (+ 11 %). Cependant, l'analyse menée par culture (Annexe V) a montré que, sans la huitième culture de courgettes, le SdC innovant a consommé 16 % d'eau d'irrigation en moins.

2.2. Les rendements commercialisables par culture

Les valeurs des rendements moyens par culture (kg/m²) sont présentées en Tableau 8. Par rapport au rendement moyen du secteur, les rendements obtenus sur les deux systèmes sont cohérents. Pour les deux cultures de tomates, le SdC innovant produit environ 4 kg/m² de moins que le SdC de référence, qui atteint lui une valeur haute par rapport au rendement du secteur. Le rendement dégagé sur pommes de terre est lui aussi inférieur d' 1 kg/m².

Ces rendements du SdC innovant sont exprimés en proportion des rendements du SdC de référence en Figure 22. Cette représentation souligne le gain de rendement pour trois des sept cultures qui sont la carotte (+ 16%), le concombre (+ 112%) et la blette (+ 137%). La perte observée la plus importante s'élève à 58 % pour la culture de pomme de terre. Il semblerait que l'année 2019 ait été favorable au SdC innovant alors qu'il a moins produit pour les cultures des autres années.

2.3. L'échelonnement des périodes de production

L'ensemble des résultats précédents est à mettre en miroir du calendrier cultural. Pour faciliter la lecture, il est disponible en Annexe VI.

En 2018, la plantation des tomates du SdC innovant a été retardée d'un mois en raison de la culture de courgettes précédente. Les jeunes plants ont souffert, au démarrage, de la saison estivale chaude. Malgré une période de production prolongée d'un mois, ils n'ont jamais atteint un rendement équivalent à ceux du SdC de référence.

En 2019, la différence de rendement observée sur la culture de carottes est liée au déplacement du tunnel. En effet, les cultures ont été semées à la même date pour les deux systèmes. Alors qu'elle est arrachée en mai dans le SdC de référence, elle est découverte dans le SdC innovant. La culture est alors conduite en plein champ à partir de mai et prolongée jusqu'en juin 2019. L'exposition aux précipitations et le mois de culture supplémentaire ont permis de gagner en calibre et d'obtenir un rendement supérieur à celui du SdC de référence. L'explication est similaire pour la culture de blettes. Plantée en octobre 2019 dans le SdC de référence, la blette est restée en place quatre mois avant d'être arrachée, en janvier 2020, pour libérer le tunnel pour la culture de pommes de terre. Dans le SdC innovant, la plantation a été avancée au mois d'août 2019. En janvier 2020, le tunnel mobile a été déplacé, laissant la blette en plein champ jusqu'en avril 2020. Trois coupes ont pu être réalisées grâce à ces quatre mois de culture supplémentaires. Ils expliquent le rendement supérieur.

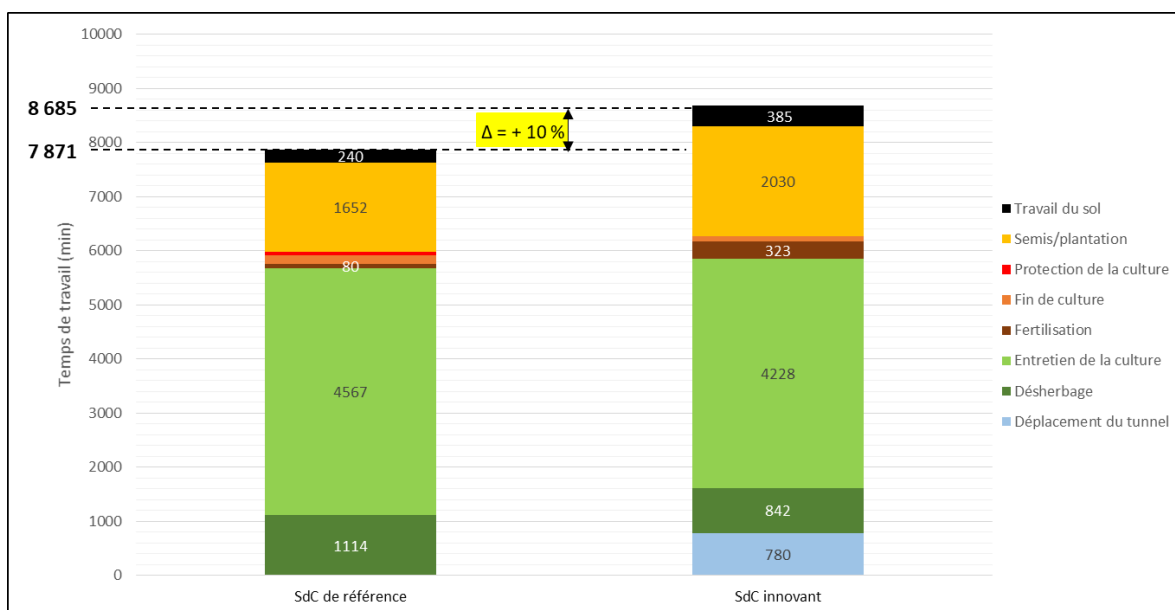


FIGURE 23 : REPARTITION DES TEMPS DE TRAVAUX PAR SYSTEME

TABLEAU 9 : CHIFFRES D'AFFAIRES PAR CULTURE DES DEUX SYSTEMES

	SdC de référence	SdC innovant	Différence (SdC _i -SdC _{ref})
TOTAL 2018	10 720,29	9 585,24	-1 135,04
Courgette	-	1 580,85	1 580,85
Tomate	9 781,09	7 065,19	-2 715,89
Laitue	939,20	939,20	0,00
TOTAL 2019	4 186,94	6 528,55	2 341,61
Carotte	1 599,73	1 622,10	22,36
Concombre	2 242,54	4 064,66	1 822,12
Blette	344,67	841,80	497,13
TOTAL 2020	9 098,07	5 618,24	-3 479,82
P.d.T	1 440,84	506,46	-934,38
Tomate	7 657,23	5 111,79	-2 545,44
TOTAUX	24 005,29	21 732,04	-2 273,25

En 2020, les plantations de pommes de terre des deux systèmes ont été réalisées en même temps. Le déplacement du tunnel mobile a eu lieu début janvier, dix jours avant la plantation. Malgré ce délai, la zone est restée découverte durant toute la période hivernale, très humide. Le sol gorgé d'eau a conduit à un rendement très faible. En tomates, la plantation a eu lieu une semaine avant dans le SdC innovant. Pour les deux systèmes, les récoltes débutent deux mois après la plantation mais la semaine de décalage est conservée : l'entrée en récolte est plus précoce d'une semaine dans le SdC innovant. Cette précocité doit permettre de vendre à un prix intéressant en début de saison, bien que les quantités soient faibles. Toutefois, le rendement cumulé obtenu est inférieur au SdC de référence. Cette observation est corrélée à celles de températures du sol et de suivi de croissance. Le sol plus froid à la plantation a sans doute freiné la croissance des plants, ce qui s'est ensuite répercuté sur le rendement moyen. La fraîcheur du sol à la plantation est expliquée par le déplacement tardif du tunnel. Il a été déplacé sur la zone le 03 avril, date où la plantation des tomates a été réalisée, sans que le sol ait pu se réchauffer.

2.4. Les temps de travaux

Les temps de travaux, en minutes, sont représentés en Figure 23 pour les huit types d'opérations définis. De manière générale, pour les deux systèmes, les opérations d'entretien de la culture sont de loin les plus chronophages, suivies des opérations de semis/plantation et de désherbage. Dans le SdC innovant, une augmentation des temps de travaux est observée sur les opérations de fertilisation (+ 304 %) et de travail du sol (+ 60 %). Les temps de fertilisation sont nettement supérieurs du fait de l'intégration des cultures intermédiaires. D'une part, ces cultures permettent une économie en intrants azotés mais impliquent d'autre part des opérations supplémentaires de semis et fauche. Le temps de travail supplémentaire dédié au travail du sol relève de l'exposition du sol aux conditions climatiques extérieures. La préparation du sol nécessite parfois plusieurs passages d'engins pour l'ameublir. Enfin, le temps alloué au déplacement du tunnel est à prendre en compte dans le SdC innovant (+ 780 min). Il est compté environ 60 min à deux personnes pour le déplacement d'une zone à l'autre. Au total, le temps de travail est supérieur de 10 % pour le SdC innovant (+ 814 min), ce qui correspond au temps de déplacement du tunnel. Autrement dit, hormis ce temps de déplacement, les temps de travaux sont équivalents dans les deux systèmes, bien que leur répartition soit différente.

3. Bilan économique : comparaison produits/charges des deux systèmes

3.1. Le poste de produits d'exploitation : la vente des légumes

Le SdC innovant dégage un chiffre d'affaires supérieur pour trois cultures sur sept et ajoute un bénéfice supplémentaire grâce à la production de courgettes (Tableau 9). Malgré cela, le chiffre d'affaires du SdC innovant est inférieur de 10 % à celui du SdC de référence. Cette perte est notamment expliquée par les faibles rendements des deux cultures de tomates. Pour chacune, la perte s'élève à plus de 2 500 €. A l'inverse, la culture de concombres de 2019 est source d'un bénéfice supplémentaire dans le SdC innovant car elle avait moins subi l'attaque de pucerons. Conformément aux faibles rendements obtenus, la culture de pommes de terre est soldée d'une perte d'environ 935 €. Cette perte est compensée de moitié par le bénéfice de la culture de blettes. Enfin, pour les cultures de laitues et carottes, les chiffres d'affaires sont similaires.

L'analyse des chiffres d'affaires par culture met en évidence la répartition différente des pertes et bénéfices.

TABLEAU 10 : CHARGES ET PRODUITS DES DEUX SYSTEMES

CHARGES				PRODUITS			
	SdC de référence	SdC innovant	Différence (SdC _i -SdC _{ref})		SdC de référence	SdC innovant	Différence (SdC _i -SdC _{ref})
Charges matériel	1 039,23	1 541,04	501,81	Produits d'exploitation	24 005,29	21 732,04	-2 273,25
Coût du tunnel	1 039,23	1 541,04	501,81	Vente de la production*	24 005,29	21 732,04	-2 273,25
Charges plants et semences	2 458,45	2 605,41	146,97				
Cultures légumières	2 458,45	2 587,96	129,51				
Cultures intermédiaires	0,00	17,45	17,45				
Achats d'intrants azotés	669,24	365,32	-303,92				
Humibio 7-5-7	84,24	40,32	-43,92				
Arvor compost	585,00	325,00	-260,00				
Charges d'entretien de la culture	188,21	367,50	179,28				
Paillages	29,81	90,55	60,74				
Ficelles	158,40	264,00	105,60				
Bâche d'occultation	0,00	12,94	12,94				
Charges de protection de la culture	279,06	239,32	-39,74				
	279,06	239,32	-39,74				
Coût du travail	1 331,68	1 469,72	138,04				
Coût horaire	1 331,68	1 469,72	138,04				
TOTAL CHARGES :	5 965,87	6 588,31	622,44	TOTAL PRODUITS :	24 005,29	21 732,04	-2 273,25

SOLDE SdC de référence : 18 039 €

Δ = - 2 895 €

SOLDE SdC innovant : 15 143 €

* : on considère que la totalité de la production récoltée est vendue.

TABLEAU 11 : APPROCHE DE LA DURABILITE DU SDC INNOVANT

Piliers de durabilité	Variable indicatrice	SdC de référence	SdC innovant		Impact sur la durabilité
			SdC innovant	%	
Économique	Production totale (kg)	6 580	6 744	- 2 %	=
Environnemental & Économique	Intrants azotés (kg N/ha)	905,7	403,5	- 49 %	+
Social & Économique	Temps de travaux (min)	7 871	8 685	+ 10 %	-
Économique	Produits d'exploitation - charges (€)	18 039	15 143	- 16 %	-

3.2. Les six postes de charges

Les six postes de charges sont repris en Tableau 10, en miroir du produit total dégagé par système. Quatre postes de charges sont supérieurs dans le SdC innovant. Il s'agit de celui des charges de matériel, des achats de plants et semences, de l'entretien de la culture et du coût du travail. Le coût d'achat du tunnel mobile représente 1,5 fois celui du tunnel fixe (SdC de référence), ce qui explique la différence observée. Les coûts d'achat en plants et semences sont supérieurs de 5 % en raison de l'implantation de la courgette et de l'intégration des cultures intermédiaires. Les charges d'entretien de la culture sont plus élevées car les paillages et ficelles sont choisis biodégradables. A quantité égale, leur coût est supérieur. A cela, s'ajoute la bâche d'occultation précédant la culture de carottes, qui n'est utilisée que dans le SdC innovant. Pour ce qui est du surcoût lié aux temps de travaux, il est à relier aux observations précédentes (Partie IV, 2.4). Les charges dédiées aux achats d'intrants azotés sont réduites de 303 € du fait des 50 % d'économie réalisés (Partie IV, 2.2).

Au total, les charges du SdC innovant sont 10 % plus élevées que celles du SdC de référence.

Le bénéfice dégagé s'élève à 15 143 € dans le SdC innovant, soit 2 895 € (16 %) de moins que le SdC de référence sur les trois années de projet. Cette différence est rapportée à la surface occupée par le système. Le solde s'élève à 115 €/m² pour le SdC de référence, contre 24 €/m² pour le SdC innovant, soit un déficit de 91 €/m².

4. Conclusion et évaluation de la durabilité du SdC innovant

Cette expérimentation avait pour objectif de tester la durabilité d'un système d'abri innovant, le tunnel mobile, en maraîchage diversifié bio. Les résultats obtenus permettent d'avancer des conclusions quant à cet objectif (Tableau 11).

Sur le plan environnemental, la durabilité est accrue grâce à une consommation en intrants azotés réduite de 50 %. Il y a économie de ressources. Cependant, cette observation est moins vraie pour la consommation en eau d'irrigation. Avec 11 % supplémentaires, elle est supérieure dans ce système mais cela est lié à l'ajout d'une huitième culture à la succession. De plus, le déplacement du tunnel mobile permet bien de valoriser les précipitations pour les cultures dont le cycle cultural comprend une partie en plein champ.

Sur le plan agronomique, les rendements du système sont satisfaisants pour trois des sept cultures de la succession, auxquels s'ajoute le rendement de courgettes. Néanmoins, quatre cultures sont moins productives dans ce système, dont les deux cultures de tomates. Représentant des cultures à forte valeur ajoutée, les faibles rendements en tomates ont conduit à un chiffre d'affaires inférieur de plus de 2 000 €. Malgré un échelonnement des périodes de production, les prix de vente ne compensent pas les faibles quantités récoltées. Parallèlement, les charges de ce système sont supérieures de 10 %. L'investissement pour l'achat du tunnel mobile est déjà conséquent : 1,5 fois celui d'un tunnel fixe. A celui-ci s'ajoute les coûts supplémentaires des semences de cultures intermédiaires, des paillages et ficelles biodégradables et des temps de travaux. L'ensemble de ces charges ne sont pas compensées par la faible économie en intrants azotés.

Finalement, le bilan économique du SdC innovant est déficitaire. Il apparaît donc que le SdC innovant est plus durable sur le plan environnemental (reproductible) mais moins rentable économiquement (Figure 26). Les aspects de transmissibilité et de viabilité de la durabilité ne sont pas étudiés dans cette évaluation. Ils pourraient faire l'objet d'indicateurs complémentaires dans la suite des analyses.

PARTIE V : DISCUSSION

Les résultats obtenus soulèvent la question suivante : **comment améliorer le bilan économique de ce système innovant tout en préservant son gain de durabilité environnementale ? Existe-il des compromis envisageables ?**

D'après le bilan économique, les charges considérées semblent peu réductibles. Il faudrait donc augmenter les produits, donc les quantités récoltées, sans perdre de vue l'objectif de durabilité de désintensification.

Deux propositions sont avancées :

- Intégrer une culture sur une des trois zones non cultivées. De cette manière, deux zones sur quatre seraient en culture parallèlement. La production supplémentaire vendue pourrait augmenter le chiffre d'affaires dégagé et pallier au déficit. La désintensification serait moins prononcée que dans le SdC testé mais toujours présente.
- Déplacer plus souvent le tunnel mobile. Cela pourrait permettre de découvrir les cultures en période de fortes chaleurs par exemple ou de valoriser une pluviométrie importante. Dans ce cas, le déplacement serait fonction des prévisions météo locales. Cette proposition implique d'une part une facilité de déplacement du tunnel mobile le long des rails, qui n'est pas encore atteinte. Il faut compter deux heures à deux personnes pour le déplacement. D'autre part, couvrir et découvrir la zone nécessite des cultures sans support pour que le tunnel puisse bouger. Cela exclurait les tomates et concombres de la succession, or, ce sont deux cultures à forte valeur ajoutée. Si elles peuvent être remplacées par des cultures sans support à même valeur ajoutée, cela serait intéressant. Sinon, cela risquerait d'accentuer le déficit de chiffre d'affaires du système.

Si l'objectif de désintensification est abandonné, il est possible de cultiver en même temps toutes les zones. L'occupation du sol est permanente, comme sous un tunnel fixe, mais les périodes de production peuvent être échelonnées. La succession culturale est intense, la durabilité environnementale limitée mais la rentabilité du système est privilégiée. Cette conduite est testée à la SERAIL depuis janvier 2020.

➤ Discussion des résultats économiques

Lors de l'étude économique, plusieurs simplifications ont volontairement été réalisées. Concernant les produits d'exploitation, il a été considéré que la totalité des productions des deux tunnels était vendue. Or, il est possible que la production du SdC de référence ne soit pas vendue dans sa totalité. Avec des dates de récolte similaires à celle du secteur, la production est en concurrence sur le marché au moment où l'offre est importante ce qui pourrait dégager des invendus. Ces pertes éventuelles, non prises en compte, pourraient diminuer le chiffre d'affaires du SdC de référence.

Concernant les charges, la redevance liée à l'irrigation a été volontairement négligée. Elle n'est pas payée à la station car le volume d'eau d'irrigation prélevé est inférieur aux 7 000 m³ requis. Néanmoins, il est possible que cette redevance soit due pour un maraîcher, notamment dans le cas d'utilisation d'eau pour le lavage des légumes.

Enfin, le coût d'immobilisation de la terre n'a pas été comptabilisé. Or, la surface est quatre fois supérieure dans le SdC innovant. Il pourrait être intéressant d'avoir un système, basé sur des

références, comptant 156 m² sous tunnel associé à trois zones de plein champ de manière à avoir une idée de la production totale d'une surface de 670 m².

➤ Discussion sur l'approche système

Dans le cadre du projet « Vers plus de durabilité en maraîchage bio », l'expérimentation système est pertinente. Elle permet de prendre en compte les effets du tunnel mobile et de la succession innovante sur les divers aspects de la durabilité. Elle apporte une vision globale comparative des deux systèmes.

Cependant, cette approche complique le dispositif expérimental, qui ne comprend pas de répétitions temporelles. L'analyse statistique des résultats est limitée. Des répétitions temporelles du système innovant seraient, en théorie, envisageables. Elles permettraient de s'affranchir des effets années liés aux conditions climatiques particulières. Par exemple, le rendement obtenu en pommes de terre dans le SdC innovant est bas en raison des conditions hivernales humides. Bien que le tunnel mobile aurait pu être déplacé sur la zone de culture plus tôt pour la protéger des précipitations, une répétition temporelle aurait permis d'observer cette culture une autre année, dans un système identique. En pratique, ces répétitions mobiliseraient une surface trop importante et un protocole lourd de collecte des données.

➤ Discussion sur l'innovation

Le tunnel mobile est un abri nouveau sur le marché, qui n'a pas encore fait ses preuves. L'expérimentation conduite à la station est, en ce sens, innovante. Elle nécessite la prise en main du matériel, dont les conséquences sur les cultures sont inconnues. Pour cela, l'équipe a dû se détacher des pratiques culturales classiques et repenser une succession culturale, en intégrant la mobilité de l'abri. Comme l'ont montré les deux rendements des cultures de tomates, les déplacements n'ont pas été suffisamment anticipés. Un point d'amélioration dans la maîtrise du tunnel mobile serait d'anticiper davantage les déplacements pour laisser le temps au sol de réchauffer avant plantation. De manière générale, on peut penser qu'une meilleure maîtrise du matériel innovant permette d'augmenter la productivité pour la même succession.

➤ Discussion sur la durabilité globale

Comme l'ont souligné les résultats, la durabilité a un coût financier. Chercher à améliorer un pilier n'est pas sans conséquence sur les autres car ils sont étroitement liés.

Le pilier social a d'ailleurs été moins évoqué ici. Il est difficile à quantifier mais une enquête pourrait par exemple estimer la satisfaction du producteur qui gagne en indépendance vis-à-vis des fournisseurs d'intrants azotés. Ce pilier est aussi représenté par le dégagement d'un revenu et donc d'un emploi sur une ferme. Pour le système innovant testé, le déficit économique pourrait être corrélé à une diminution de la durabilité sociale car l'emploi à long terme ne serait pas garanti.

En ce qui concerne la transmissibilité, il semblerait que la désintensification et les déplacements du tunnel causent une moindre dégradation des sols et permettent la pérennisation de terres cultivées. Cependant, la conduite en tunnel mobile devra être testée sur une plus longue échelle de temps pour vérifier cette hypothèse.

De manière générale, le choix revient aux producteurs. Selon leurs objectifs de vie et de travail, l'intérêt pour le tunnel mobile est présent ou non. Si l'objectif est la durabilité environnementale, alors ce système peut apporter des éléments de réponse. Si la rentabilité du système est la priorité, alors le tunnel mobile n'est pas le plus approprié. Dans tous les cas, ce système doit évoluer pour tendre vers une meilleure rentabilité économique, qui convaincra davantage.

CONCLUSION

La durabilité environnementale et économique des systèmes maraîchers bio sous abri est fragile. Des leviers existent, comme l'intégration de cultures intermédiaires multiservices dans les successions culturales. Cela nécessite des périodes d'interculture, qui ne sont pas dégagées dans les successions classiques sous abri. A l'inverse, les cultures s'y succèdent et l'occupation du sol est permanente.

Une innovation, le tunnel mobile, permet de revoir ces successions et le pilotage de ces systèmes. Les successions se désintensifient, se diversifient et le calendrier cultural gagne en souplesse. Il n'est plus obligatoire de détruire la culture en place avant d'implanter la suivante, sur une autre zone. Les dates d'implantation peuvent être anticipées alors que les périodes de production peuvent être échelonnées. Les zones non occupées par une culture légumière peuvent accueillir une culture intermédiaire multiservices, permettant d'envisager un pilotage de la fertilisation économe en intrants azotés.

C'est dans cette optique que le projet « Vers plus de durabilité » comporte une action d'évaluation d'un système de culture sous abri innovant, incluant un tunnel mobile. Le tunnel est rendu mobile grâce à des adaptations techniques. Sa mobilité soutient plusieurs hypothèses de durabilité, exploitées par la succession culturale établie. Le pilotage intègre plusieurs principes qui visent une moindre consommation de ressources et une désintensification maximisée. Les conséquences de ce pilotage innovant sur la durabilité globale font l'objet des résultats à l'échelle système.

Ils ont mis en évidence une économie de 50 % en intrants azotés, compensée par la restitution d'azote liée à l'enfouissement des cultures intermédiaires. Les résultats sur l'eau révèlent une consommation légèrement supérieure, liée à la huitième culture de courgette de la succession. Les rendements moyens par culture sont supérieurs dans le système innovant pour trois cultures sur sept. Malgré ces rendements observés et l'échelonnement réussi des périodes de production, les produits d'exploitation sont inférieurs, entre autre, à cause des faibles rendements des deux cultures de tomates. Ces résultats système sont complétés par une étude à l'échelle de la culture de tomates de 2020. Elle explique la perte de rendement observée par une perte de vigueur, elle-même liée à des températures du sol plus froides à la plantation. A l'échelle du système, le déficit économique engendré n'est pas compensé par des charges moins élevées. Au contraire, le coût du travail est supérieur car les temps de travaux, incluant le temps de déplacement du tunnel mobile, sont supérieurs. Il en est de même pour le coût d'achat du tunnel, qui est 1,5 fois plus élevé que pour un tunnel fixe, les coûts des matériaux biodégradables et des semences des cultures intermédiaires.

L'ensemble des résultats, obtenus sur trois ans de projet, montre que le système innovant peut accroître la durabilité environnementale par le biais d'économies de ressources. Cependant, cette durabilité environnementale est contrebalancée par un déficit économique. Le système, plus durable environnementalement, est moins rentable économiquement.

Cette analyse pose la question du coût de la durabilité, à laquelle l'expérimentation n'apporte pas de réponse. Elle chiffre ce coût mais l'engagement pour ce système innovant dépend des objectifs et priorités des maraîchers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence Bio. (2018). *Découvrir le bio—Ses garanties*. Agence Bio. Disponible à l'adresse : <https://www.agencebio.org/decouvrir-le-bio/ses-garanties/>
- Agreste. (2019). Statistique agricole annuelle 2017-2018—Données définitives. *Chiffres et données, 2019-16*, 62.
- Agreste DRAAF Bretagne. (2014). La filière légumes en Bretagne. *Les Cahiers Régionaux*, 12.
- Agrobio35. (2012). Fiche Tomates. *Les fiches techniques, 20*, 2. Disponible à l'adresse : https://www.agrobio-bretagne.org/wp-content/uploads/2012/04/fiche_tomates.pdf
- Altieri, M. A., Wilson, R. C., & Schmidt, L. L. (1985). The effects of living mulches and weed cover on the dynamics of foliage- and soil-arthropod communities in three crop systems. *Crop Protection, 4*(2), 201-213. Disponible à l'adresse : [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(85\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0261-2194(85)90018-3)
- Ave, B. (2014). Building the Modular Moveable Cathedral Tunnel Designed By Eliot Coleman at Four Season Farm. *Johnny's Selected Seeds*, 30.
- Bertrand, C. (2001). Lutter contre les nématodes à galles en Agriculture Biologique. *GRAB, ITAB*, 4.
- Blancard, D., & Mayet, V. (2013). *Verticilliose*. Ephytia. Disponible à l'adresse : <http://ephytia.inra.fr/fr/C/8065/Courgette-courges-Verticillium-dahliae>
- Bohanec, M. (2008). *DEXi : Program for Multi-Attribute Decision Making User's Manual*. 56.
- Bonny, S. (1994). Les possibilités d'un modèle de développement durable en agriculture : Le cas de la France. *Le courrier de l'environnement INRA, 23*, 12.
- Brundtland, G., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S., & Chidzero, B. (1987). Our common future. *New York, 8*. Disponible à l'adresse : http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pp/EnCom15/28Nov/SustDev/HELD_SustDev_UNECE_EnComm15_2006_c.pdf
- Calmet, J.P. & Le Lan, M. (2019). Calendriers culturels et données techniques et économiques en Agriculture Biologique. *Cultures maraîchères dans le Morbihan*, 51.
- Charles, R., Wendling, M., Büchi, L., Casagrande, M., Celette, F., Fontaine, L., & Jouany, C. (2017). Les CIMS pour améliorer la productivité en Agriculture Biologique dans les systèmes de culture assolés. *Innovations agronomiques, 62*, 131-141. DOI 10.15454/1.517407968140441E12
- CIVAM. (2008). *Indicateurs de résultats en Agriculture Durable*. 10.
- Coleman, E. (2009). *The winter harvest handbook : Year-round vegetable production using deep-organic techniques and unheated greenhouses*. Chelsea Green Pub.
- Constantin, J., Beaudoin, N., Meyer, N., Crignon, R., Tribouillois, H., Mary, B., & Justes, E. (2017). Concilier la réduction de la lixiviation nitrique, la restitution d'azote à la culture suivante et la gestion de l'eau avec

- les cultures intermédiaires. *Innovations agronomiques*, 62, 1-12. DOI 10.15454/1.517407043672525E12
- Dabney, S. M., Delgado, J. A., & Reeves, D. W. (2001). Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8), 1221-1250. DOI 10.1081/CSS-100104110
- Estorgues, V., Lecuyer, G., Allainguillaume, J., & Fayola, V. (2017). DEXiPM – Field Vegetables : Un modèle d'analyse ex ante de la durabilité des systèmes légumiers. *Innovations agronomiques*, 61, 91-98. DOI hal-01731151
- FranceAgriMer. (2018). *La filière fruits et légumes—Données 2017*. Disponible à l'adresse : <https://www.franceagrimer.fr/Eclairer/Etudes-et-Analyses/Chiffres-et-bilans?moteur%5BfiltreFiliere%5D=1498&page=1>
- Galinato, S. P., & Miles, C. A. (2013). Economic Profitability of Growing Lettuce and Tomato in Western Washington under High Tunnel and Open-field Production Systems. *HortTechnology*, 23(4), 453-461. DOI 10.21273/HORTTECH.23.4.453
- Gebhard, C.-A., Büchi, L., Liebisch, F., Sinaj, S., & Ramseier, H. (2013). Screening de légumineuses pour couverts végétaux : Azote et adventices. *Recherche agronomique Suisse*, 4, 384-393.
- Gueudet, A., Bossuat, H., Pradel, M., Lellahi, A., & Tailleur, A. (2013). L'Analyse de Cycle de Vie appliquée au secteur agricole—Adaptation et mise en œuvre de la méthodologie ACV au regard du poste fertilisation. *COMIFER*, 10.
- Jenni, S. (s. d.). Modification du climat sous les grands tunnels. *Agriculture et agroalimentaire Canada*, 3.
- Kaiser, C., & Ernst, M. (2012). High tunnel overview. *Center for Crop Diversification, University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment*. Disponible à l'adresse : <http://www.uky.edu/ccd/sites/www.uky.edu.ccd/files/hightunneloverview.pdf>
- Knewton, S. J. B., Kirkham, M. B., Janke, R. R., Murray, L. W., & Carey, E. E. (2012). Soil quality after eight years under high tunnels. *HortScience*, 47(11), 1630-1633. DOI 10.21273/HORTSCI.47.11.1630
- Lamont, W. J. (2009). Overview of the use of high tunnels worldwide. *HortTechnology*, 19(1), 25-29. DOI 10.21273/HORTSCI.19.1.25
- Landais, E. (1998). Agriculture durable : Les fondements d'un nouveau contrat social ? *Courrier de l'environnement INRA*, 33, 18.
- Launais, Bzdrenga, Estorgues, V., Fayola, V., Jeannequin, B., Lheureux, S., Nivet, L., Scherrer, B., Sinoir, N., Szilvasi, S., Taussig, C., Terrentroy, A., Trottin-Caudal, Y., & Villeneuve, F. (2014). Fiches techniques. *Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutique*, 129-178.
- Le Berre, M. (1972). La culture de légumes et le développement urbain autour de Grenoble. *Revue de Géographie Alpine*, 1, 43-73. DOI 10.3406/rga.1972.1249
- Miles, C., Wallace, R., Wszelaki, A., Martin, J., Cowan, J., Walters, T., & Inglis, D. (2012). Deterioration of Potentially Biodegradable Alternatives to Black Plastic Mulch in Three Tomato Production Regions. *HortScience*, 47(9), 1270-1277. DOI 10.21273/HORTSCI.47.9.1270

- Perkus, E. A. (2018). *Legume cover crops in high tunnels: Field evaluation for soil health and controlled environment freezing tolerance*. Thèse de master, University of Minnesota.
- Péron, J. (2006). *Références productions légumières* (Librairie GERMER BAILLIERE et CIE).
- Qasem, J. R. (2009). Weed competition in cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. Botrytis) in the Jordan Valley. *Scientia Horticulturae*, 121(3), 255-259. DOI 10.1016/j.scienta.2009.02.010
- Robačar, M., Canali, S., Kristensen, H. L., Bavec, F., Mlakar, S. G., Jakop, M., & Bavec, M. (2015). Cover crops in organic field vegetable production. *Scientia Horticulturae*, 208, 104-110. DOI 10.1016/j.scienta.2015.12.029
- Sebillotte, M. (1990). Systèmes de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *Les systèmes de culture*, 165-196.
- Thibault, C., & Lecompte, F. (2018). Gestion de la fertilité des sols en cultures légumières et maraîchères. *Rapport d'études du GIS PIClég*, 72.
- van der Werf, H. M. G., Kanyarushoki, C., & Corson, M. S. (2011). L'Analyse de Cycle de Vie : Un nouveau regard sur les systèmes de production agricole. *Innovations agronomiques*, 12, 121-133.
- Vilain, L. (1997). A la recherche des indicateurs du développement agricole durable. *Travaux et Innovations*, 43, 53-54.
- Waterer, D. (2003). Yields and economics of high tunnels for production of warm-season vegetable crops. *HortTechnology*, 13(2), 339-343. DOI 10.21273/HORTTECH.13.2.0339
- Zahm, F., Alonso Ugaglia, A., Barbier, J.-M., Boureau, H., Del'homme, B., Gafsi, M., Gasselin, P., Girard, S., Guichard, L., Loyce, C., Manneville, V., Menet, A., & Redlingshöfer, B. (2019). Évaluer la durabilité des exploitations agricoles. La méthode IDEA v4, un cadre conceptuel combinant dimensions et propriétés de la durabilité. *Cahiers Agricultures*, 28, 5. DOI 10.1051/cagri/2019004

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : ANALYSES DE SOL REALISEES SUR LES PARCELLES EXPERIMENTALES EN 2018

ANNEXE II : TABLEAU DES ESPECES ET VARIETES CULTIVEES DANS L'EXPERIMENTATION

ANNEXE III : ITINERAIRES TECHNIQUES REALISES POUR LES DEUX SYSTEMES

ANNEXE IV : FEUILLES DE NOTATION SUIVI DE CROISSANCE SUR CULTURE DE TOMATES SOUS ABRI

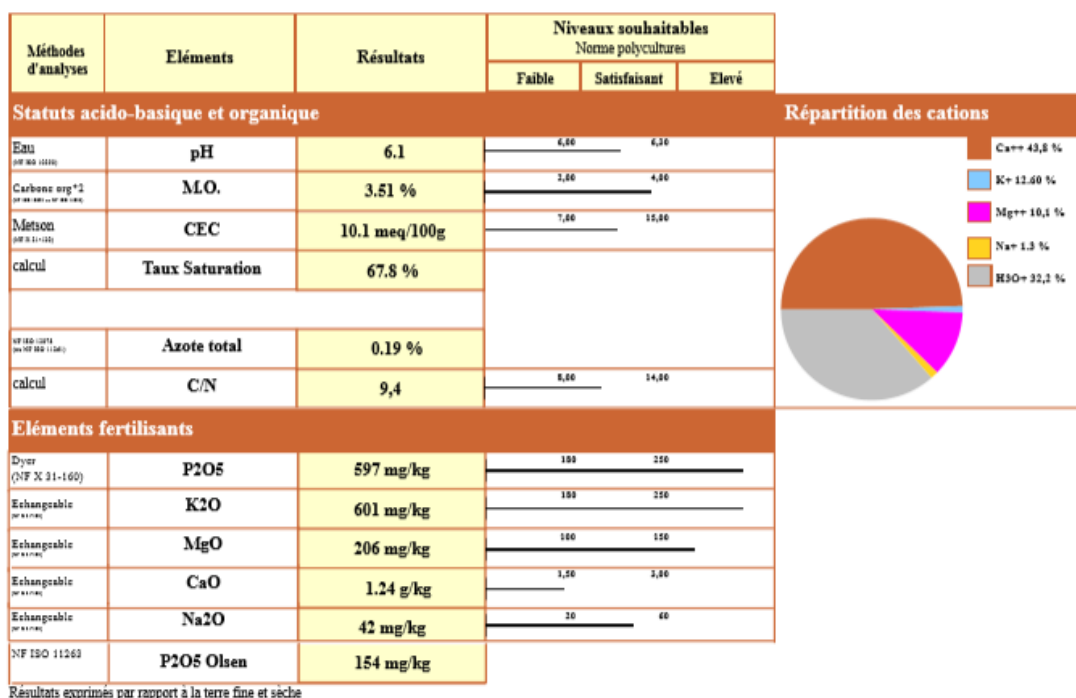
ANNEXE V : RESULTATS PAR CULTURE DES CONSOMMATIONS EN INTRANTS AZOTES ET EAU D'IRRIGATION

ANNEXE VI : CALENDRIER CULTURAL COMPARATIF DES DEUX SYSTEMES DE CULTURE

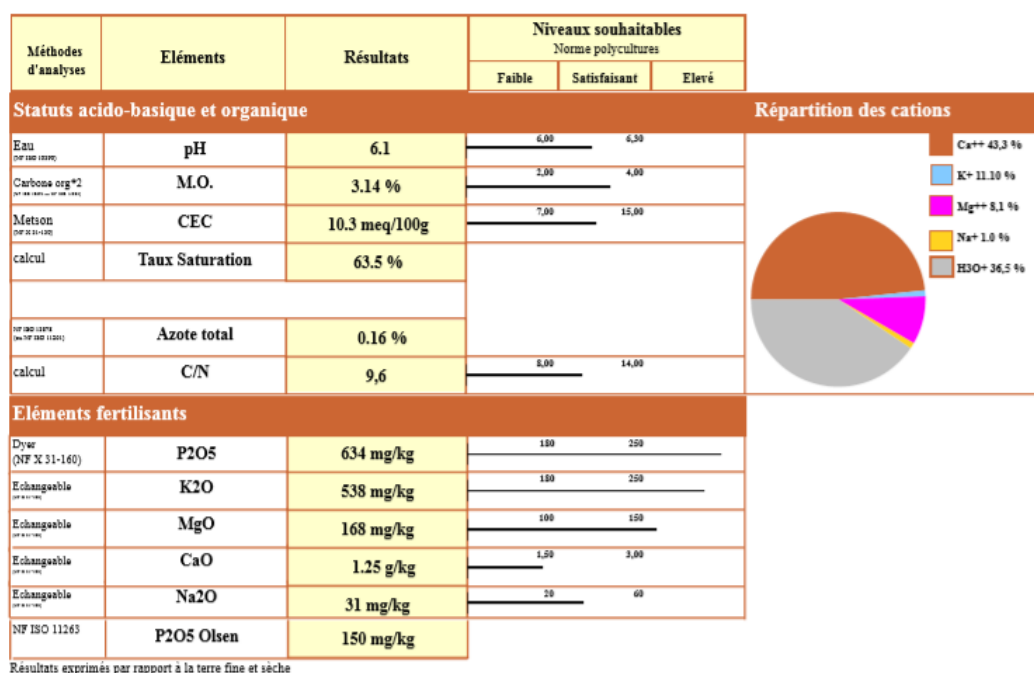
ANNEXE I : ANALYSES DE SOL REALISEES SUR LES PARCELLES EXPERIMENTALES EN 2018

Analyses réalisées par le laboratoire Capinov, sur deux échantillons de terre prélevés le 10/04/2018.

Parcelle du SdC de référence – T5AB



Parcelle du SdC innovant en zone B – T4AB



ANNEXE II : TABLEAU DES ESPECES ET VARIETES CULTIVEES DANS L'EXPERIMENTATION

	Espèce végétale	Nom latin	Variété	Distributeur	Densité de plantation
Légumes	Blette	<i>Beta vulgaris</i>	Cardes blanches	BioSem	14 mottes/m ²
	Carotte	<i>Daucus carota subsp. sativus</i>	Napoli	Isitop	3 doubles rangs par planche
	Concombre	<i>Cucumis sativus</i>	Dreamliner greffé	BioSem	1,25 plant/m ²
	Courgette	<i>Cucurbita pepo</i>	Parthenon	BioSem	1 plant tous les 50cm
	Laitue	<i>Lactuca sativa</i>	Ferega	Vitalis	14 mottes/m ²
	Pommes de terre	<i>Solanum tuberosum</i>	Margod	Payzons ferme	10 tubercules/ml
	Tomate	<i>Lycopersicum esculentum</i>	Cauralina greffée	Gautier Semences	1 plant tous les 50cm
Cultures intermédiaires	Avoine	<i>Avena sativa</i>	Duffy	AgroBio Pinault	50 kg/ha en mélange
	Féverole d'hiver	<i>Vicia faba</i>	Irena		90 kg/ha
	Phacélie	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	Natra		10 kg/ha
	Sarrasin	<i>Fagopyrum tataricum</i>	Kora		40 kg/ha
	Sorgho	<i>Sorghum sudane</i>	Piper		25 kg/ha
	Trèfle	<i>Trifolium incarnatum</i>	Rosa		15 kg/ha en mélange

ANNEXE III : ITINERAIRES TECHNIQUES REALISES POUR LES DEUX SYSTEMES

Culture	Type d'opération	Détails de l'opération	SdC de référence	SdC innovant
Courgettes 2018	Travail du sol	Rotobèche	Pas de culture de courgettes	05/03/2018
		Canadien		23/02/2018
		Cultirateau		06/03/2018
	Fertilisation	Engrais		1,1 t/ha d'Humibio
	Semis/plantation			12/03/2018
	Récoltes			Du 27/04 au 06/07
	Traitements phytosanitaires			Aucun
	Déplacement du tunnel			Le 07/05/2018
	Gestion de la fin de culture			Le 06/07/2018 puis occultation
	Tomates 2018	Travail du sol		Rotobèche
Canadien			27/03/2018	04/05/2018
Cultirateau			06/03/2018	04/05/2018
Fertilisation		Biomasse du couvert	-	Trèfle avoine : 1,5 kg/m ²
		Engrais	1 t/ha d'Humibio 10 t/ha Arvor compost	Aucun
Semis/plantation		05/04/2018	09/05/2018	
Entretien de la culture		Effeuilages	29/05, 28/06, 04/07, 01/08, 08/08, 16/07, 19/09	19/07, 31/07, 21/08, 14/09, 17/09
		Enroulages égourmandages	20/04, 23/04, 30/04, 11/05, 28/05, 05/07, 04/06, 14/06	14/05, 28/05, 04/06, 27/06, 04/07, 18/07, 31/07, 21/08, 10/10
		Etêtage des plants	29/08/2018	14/09/2019
Récoltes		Du 08/06 au 03/10	Du 28/06 au 14/11	
Traitements phytosanitaires		DIPEL DF 1 kg/ha	27/07 et 24/08/2018	27/07 et 24/08/2018
		OsiryI 20 L/ha	26/04/2018	-
Lâcher d'auxiliaires <i>Macrolophus pygmaeus</i> (1/m ²)		17/05/2018	-	
Déplacement du tunnel		-	Le 15/11/2018	
Gestion de la fin de culture		Destruction le 10/10/2018	Le 14/11/2018 puis semis d'avoine fêverole	
Laitues 2018	Travail du sol	Rotobèche	10/10/2018	-
		Canadien	10/10/2018	-
		Cultirateau	06/03/2018	24/09/2018
	Fertilisation	Biomasse du couvert	-	Trèfle avoine : 1,5 kg/m ²
		Engrais	1,2 t/ha d'Humibio	1 t/ha d'Humibio
	Semis/plantation		12/10/2018	25/09/2018
	Traitements phytosanitaires		Aucun	Aucun
	Déplacement du tunnel		-	Le 04/02/2019
Gestion de la fin de culture		01/2019	En janvier 2019 puis semis d'avoine fêverole	

Culture	Type d'opération	Détails de l'opération	SdC de référence	SdC innovant
Carottes 2019	Travail du sol	Rotobèche	04/02/2019	10/07/2018
		Canadien	-	10/07/2018
		Cultirateau	04/02/2016	10/07/2018
	Fertilisation	Biomasse du couvert	-	Féverole : 5 kg/m ²
		Engrais	800 kg/ha d'Humibio	Aucun apport
	Semis/plantation		04/02/2019	04/02/2019
	Récoltes		Du 29/04 au 29/05/2019	Du 29/04 au 19/06/2019
	Traitements phytosanitaires		Aucun	Aucun
	Déplacement du tunnel		-	Le 14/05/2019
	Gestion de la fin de culture		29/05/2019	19/06/2019 puis semis de sorgho
Concombres 2019	Travail du sol	Rotobèche	31/05/2019	-
		Canadien	29/05/2019	13/05/2019
		Cultirateau	03/06/2019	13/05/2019
	Fertilisation	Biomasse du couvert	-	Avoine féverole : 5,0 kg/m ²
		Engrais	1 t/ha d'Humibio 10 t/ha Arvor compost	Aucun
	Semis/plantation		06/06/2019	16/05/2019
	Entretien de la culture	Enroulages égourmandages	12/06, 19/06, 24/06, 28/06, 03/07, 04/07, 09/07, 18/07, 25/07, 07/08, 12/08, 27/08	28/05, 04/06, 11/06, 19/06, 25/06, 10/07, 18/07, 25/07, 08/08, 12/08, 27/08
		Descentes	17/07, 23/07, 31/07	17/07, 31/07, 08/08, 12/08
	Récoltes		Du 05/07 au 01/10	Du 18/06 au 11/10
	Traitements phytosanitaires	Flipper 16 L/ha	06/06 et 10/07/2019	-
		Armicarb 0,3 g/m ²	-	04/09/2019
	Lâchers d'auxiliaires	<i>Aphidoletes</i>	13/06 et 03/07/2019	13/06 et 03/07/2019
		<i>Aphidaxis</i>	13/06/2019	-
		Swirskii Breeding S	-	13/06/2019
		<i>Aphidius</i>	03/07/2019	03/07/2019
		Chrysope	03/07/2019	03/07/2019
	Déplacement du tunnel		-	Le 14/11/2019
	Gestion de la fin de culture		01/10/2019	Le 29/10/2019 puis semis d'avoine trèfle
Blettes 2019	Travail du sol	Rotobèche	02/10/2019	29/08/2019
		Canadien	01/10/2019	-
		Cultirateau	02/10/2019	29/08/2019
	Fertilisation	Biomasse du couvert	-	Féverole : 7,1 kg/m ² Sarrasin : 1,7 kg/m ²
		Engrais	1,2 t/ha d'Humibio	1 t/ha d'Humibio
	Semis/plantation		02/10/2019	29/08/2019
	Récoltes		Du 21/11 au 16/12/2019	Du 21/11 au 23/04/2020
	Traitements phytosanitaires		Aucun	Aucun
	Déplacement du tunnel		-	Le 06/01/2020
	Gestion de la fin de culture		21/01/2020	Le 27/04/2020 puis semis de sorgho

Culture	Type d'opération	Détails de l'opération	SdC de référence	SdC innovant
Pommes de terre 2020	Travail du sol	Rotobèche	22/01/2020	20/01/2020
		Canadien	-	13/01/2020
		Cultirateur	-	-
	Fertilisation	Engrais	Humibio : 1 t/ha 22/01/2020	Humibio : 0,5 t/ha 20/01/2020
	Semis/plantation		23/01/2020	21/01/2020
	Récoltes		Le 06/04/2020	Le 15/04/2020
	Traitements phytosanitaires		Aucun	Aucun
	Déplacement du tunnel		-	Le 03/04/2020
Gestion de la fin de culture		06/04/2020	Le 15/04 puis semis de sorgho	
Tomates 2020	Travail du sol	Rotobèche	09/04/2020	30/03/2020 03/04/2020
		Canadien	09/04/2020	30/03/2020
		Cultirateur	09/04/2020	03/04/2020
	Fertilisation	Biomasse du couvert	-	Avoine fêverole : 4,0 kg/m ²
		Engrais	Humibio : 1,3 t/ha Arvor compost : 25 t/ha 09/04/2020	Arvor compost : 25 t/ha 02/04/2020
	Semis/plantation		09/04/2020	03/04/2020
	Entretien de la culture	Effeuilages	06/05, 28/05, 09/06, 01/07, 16/07	06/05, 17/06, 09/07
		Enroulage égourmandage	29/04, 06/05, 14/05, 04/06, 17/06, 03/07, 06/08	29/04, 06/05, 15/05, 28/05, 04/06, 17/06, 03/07, 09/07, 21/07, 06/08
	Récoltes		Du 11/06 au ...	Du 03/06 au ...
	Traitements phytosanitaires	Pherodis 1 dose	28/04 et 23/07/2020	28/04 et 23/07/2020
		Macc 80 jardin 5 kg/ha	03/07/2020	-
	Lâcher d'auxiliaires <i>Macrolophus pygmaeus</i> (1/m ²)		29/04 et 04/06/2020	29/04 et 04/06/2020
	Déplacement du tunnel		-	Prévu en semaine 42
Gestion de la fin de culture		Culture toujours en place en août 2020		
Laitues 2020	Semis/plantation		Prévue en semaine 42	Prévue en semaine 39 en plein champ

ANNEXE V : RESULTATS PAR CULTURE DES CONSOMMATIONS EN INTRANTS AZOTES ET EAU D'IRRIGATION

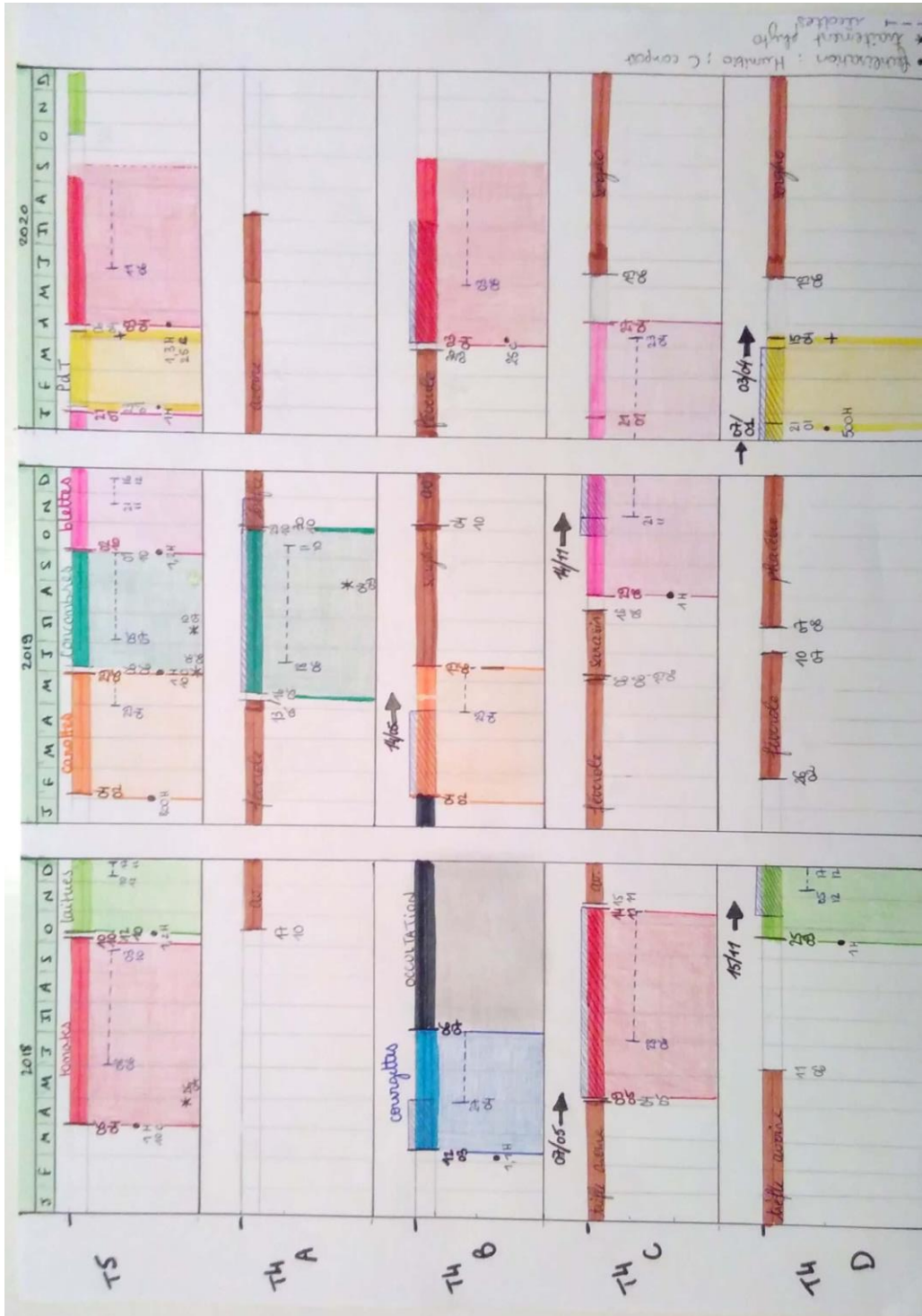
Consommation en intrants azotés et unités restituées des cultures intermédiaires :

Année	Culture en place	Besoins de la culture* (kg N/ha)	SdC de référence	SdC innovant	Différence unités apportées par fertilisants (kg N/ha)	Intrants azotés apportés en % du SdC de référence	SdC innovant		
			Unités apportées par fertilisants (kg N/ha)	Unités apportées par fertilisants (kg N/ha)			Culture intermédiaire précédente	Unités restituées par la culture intermédiaire (kg N/ha)	Unités totales fournies à la culture (kg N/ha)
2018	Courgette	150	-	77	-	-	-	-	77
	Tomate	250	154,6	0	-154,6	-100	Trèfle avoine	40	40
	Laitue	80	84	70	-14	-17	Trèfle avoine	40	110
2019	Carotte	160	56	0	-56	-100	Occultation	-	0
	Concombre	200	154,6	0	-154,6	-100	Avoine féverole	145	145
	Blette	160	84	70	-14	-17	Sarrasin	20	90
2020	P.d.T	110	70	35	-35	-50	Féverole	70	105
	Tomate	300	302,5	211,5	-91	-30	Avoine féverole	125	336,5
	TOTAL		905,7	463,5	-442,2	-49		440	903,5

Consommation en eau d'irrigation et pluviométrie valorisée :

Année	Culture	SdC de référence	SdC innovant	Différence en eau d'irrigation $SdC_i - SdC_{ref}$ (mm)	Eau d'irrigation consommée en % SdC de référence	SdC innovant	
		Apports totaux en eau d'irrigation (mm)	Apports totaux en eau d'irrigation (mm)			Pluviométrie cumulée sur la période de culture en plein champ (mm)	Quantité totale en eau sur la période de culture (mm)
2018	Courgette	-	705,1	-	-	141,6	846,7
	Tomate	839,7	416,7	-423,1	-50	0,0	416,7
	Laitue	44,9	38,5	-6,4	-14	85,2	123,7
2019	Carotte	224,4	109,0	-115,4	-51	104,1	213,1
	Concombre	833,3	694,9	-138,5	-17	0,0	694,9
	Blette	14,1	1,9	-12,2	-86	348,4	350,3
2020	P.d.T	32,1	14,1	-17,9	-56	7,4	21,5
	Tomate	634,0	926,3	292,3	46	0,0	926,3
	TOTAL	2622,4	2906,4	284,0	+ 11 %	686,7	3593,1

ANNEXE VI : CALENDRIER CULTURAL COMPARATIF DES DEUX SYSTEMES DE CULTURE



INDEX

Circuits courts : mode de commercialisation limitant les intermédiaires entre le producteur et les consommateurs. Ils comprennent la vente directe (aucun intermédiaire) ou la vente incluant un intermédiaire.

Evapotranspiration : cumul, pour un milieu et des conditions pédoclimatiques donnés, de l'évaporation de l'eau en surface du sol et de la transpiration du couvert végétal.

Expérimentation : méthode scientifique qui consiste à vérifier des hypothèses par la mise en place d'expérience.

Indicateur : donnée simple, reproductible, quantifiable et synthétique qui, confrontée à une référence, permet de prendre une décision.

(une) Innovation : produit nouveau ou amélioré qui, en proposant une solution à un problème, se diffuse au plus grand nombre d'utilisateurs.

Itinéraire technique et cultural : combinaison logique et ordonnée de pratiques et techniques de culture.


Lutte biologique : méthode visant à contrôler les bioagresseurs par des techniques alternatives telles que l'intégration d'organismes vivants antagonistes.

Maladie tellurique : maladie liée à la présence de bioagresseurs (souvent champignons ou virus) sur ou dans le sol.

Service écosystémique : bénéfique, matériel ou immatériel, que l'Homme tire des écosystèmes pour assurer son bien-être.

Succession culturale ou rotation : enchaînement des cultures, généralement à intervalle régulier, sur une parcelle donnée.

Système de culture : ensemble des modalités techniques appliquées à des parcelles traitées de manière identique.

	Diplôme : Ingénieur agronome Spécialité : Sciences et Ingénierie du Végétal Spécialisation / option : Agrosystèmes Enseignant référent : Safya MENASSERI
Auteur(s) : Maureen GICQUEL Date de naissance* : 20/04/1996	Organisme d'accueil : Station Expérimentale Horticole de Bretagne Sud
Nb pages : 25 Annexe(s) : VI	Adresse : Route du Bono, 56400 AURAY
Année de soutenance : 2020	Maître de stage : Maët LE LAN
Titre français : Vers plus de durabilité en maraîchage bio : évaluation d'un système d'abri innovant.	
Titre anglais : Reach more sustainability in vegetable cropping : moveable high tunnel assessment.	
<p>Résumé : Les systèmes maraîchers sous abri imposent des successions culturales intenses, basées sur l'alternance des Solanacées et Cucurbitacées, et une occupation du sol continue. Ils sont confrontés à des problématiques sanitaires limitant leur durabilité sur le long terme. Un des leviers de durabilité consiste à intégrer des cultures intermédiaires multiservices. Cette intégration est envisageable grâce à une innovation : le tunnel mobile. Il fait l'objet d'une expérimentation, menée à la station expérimentale d'Auray, entre 2018 et 2020. Avec l'optique de désintensifier, diversifier et d'allonger les périodes de production, la succession culturale a été adaptée. Elle inclut une huitième culture de courgettes et des cultures intermédiaires sur les zones non cultivées. Ce système de culture innovant est comparé à un système de référence, conduit en bio sous abri. Des relevés de rendements, de consommations en intrants azotés et de temps de travaux ont été réalisés pour les deux systèmes. Des économies en intrants azotés ont pu être réalisées dans le système innovant. Avec les conditions pédoclimatiques de l'essai, les rendements sont variables d'une culture à l'autre dans les deux systèmes. Des pertes sont observées sur les deux cultures de tomates à forte valeur ajoutée. Les temps de travaux sont supérieurs de 10 % pour ce système, en lien avec le déplacement du tunnel et les opérations liées à l'intégration des cultures intermédiaires. Le bilan économique révèle une différence de 2 895 € entre les deux systèmes, en défaveur du système innovant. Les résultats obtenus laissent penser que la durabilité environnementale est renforcée dans le système innovant au dépit d'une perte économique. Ces résultats pourraient ensuite être intégrés à une évaluation multicritères de la durabilité.</p>	
<p>Abstract: Market gardening systems under shelter are linked to intense crop rotation, based on the Solanaceae and Cucurbitaceae alternation with a continuous soil occupation. They face health problems that limit their long-term sustainability. One of the sustainability levers consists in integrating intermediate crops into the succession. This integration is possible thanks to an innovation: the mobile hoop house. It is tested at the Auray experimental station between 2018 and 2020. With an objective of de-intensifying, diversifying and extending the production periods, the crop rotation has been adapted. It includes an eighth crop of zucchini and intermediate crops on uncultivated areas. This innovative system is compared to a reference system, conducted under a classic hoop house. Yields, nitrogen inputs and work time were recorded for both systems. Savings in nitrogen inputs (-49%) were achieved in the innovative system. With the pedoclimatic conditions of the trial, yields are variable in both systems. The two tomato crops yields were lower, resulting in a significant loss of benefit. Work times are 10% higher for this system, due to the tunnel shift and the operations related to the intermediate crops. The economic balance revealed a € 2895 difference between the two systems, to the disadvantage of the innovative system. The results obtained suggest that environmental sustainability is enhanced in the innovative system despite an economic loss. Then, these results could be integrated to a multi-criteria sustainability assessment.</p>	
Mots-clés : durabilité, maraîchage diversifié, innovation, tunnel mobile, évaluation multicritères	
Key Words : sustainability, market gardening, innovation, movable high tunnels, multicriteria assessment	