



ORION

Outils d'aide à la décision innovants pour une meilleure utilisation de la ressource en eau et du potentiel nutritif du sol



Elodie DERIVRY, Claire GOILLON et Catherine TAUSSIG – APREL
 Thomas HAULBERT et Lucas TOSELLO – Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône
 Laurence GELY – CETA Sainte-Anne (13)

Table des matières

1. Introduction.....	2
2. Matériel et méthode.....	2
1.1 Facteurs et modalités étudiées.....	2
1.2 Observations et mesures.....	3
3. Site A : Culture sous abris.....	5
3.1 Contexte	5
3.2 Campagne 2018 – suivi tunnel A1.....	6
3.2.1 Analyse T0 de la parcelle	6
3.2.2 Suivi de la culture	8
3.2.3 Synthèse fin de culture	12
3.3 Campagne 2019 – suivi tunnel A2.....	13
3.3.1 Analyse T0 de la parcelle	13
3.3.2 Suivi de la culture	15
3.3.3 Conduite climatique, CIRAME	18
3.3.4 Synthèse fin de culture	21
4. Site B : Culture en plein champ.....	21
4.1 Contexte	21
4.2 Campagne 2018 – suivi parcelle B1	21
4.2.1 Analyse T0 de la parcelle	21
4.2.2 Suivi de la culture	23
4.2.3 Synthèse fin de culture	26
4.3 Campagne 2019 – suivi parcelle B2.....	26
4.3.1 Analyse T0 de la parcelle	26
4.3.2 Analyse de l'impact de l'engrais vert	26
4.3.3 Suivi de la culture	27
4.3.4 Synthèse fin de culture	30
5. Conclusion.....	31

Partenaires



Ceta Ste
Anne



1. Introduction

Le projet Orion est un projet financé par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, débuté en juillet 2017 et prenant fin en juin 2020.

L'objectif de ce projet est de proposer une approche intégrative de la gestion du risque de pollution des eaux issues des pratiques agricoles, en raisonnant à la fois les apports d'eau et les apports de fertilisants. Cela s'est traduit en proposant notamment des modifications de pratiques agricoles, avec l'apport de matière organique, qui améliorent, à moyen terme, la fertilité et l'activité biologique du sol. Le but général du projet a été de construire une boîte à outils à destination des producteurs de légumes sous abri et en plein champ leur permettant de :

- maîtriser les irrigations avec un outil fiable,
- améliorer l'utilisation de la matière organique grâce à une meilleure prise en compte de la fourniture d'azote et la caractérisation, à l'aide d'indicateurs, des effets d'apport de MO exogène sur la qualité du sol,
- améliorer le pilotage de la fertilisation organique et minérale.

Pour cela, l'APREL en partenariat avec l'Ardepi, le CETA Ste Anne et la Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône ont mis en place pendant 2 ans des suivis sur 2 sites : un site en plein champ et un site sous abris représentatifs des systèmes de culture de la région.

Le rapport suivant présente l'ensemble des observations réalisées sur les deux sites du projet autour de la gestion de la fertilité des sols. Parallèlement, le pilotage de l'irrigation sur ces deux sites avec des outils innovants fait l'objet d'un rapport complémentaire rédigé par l'Ardepi.

L'objectif sur chaque parcelle a été de déterminer, dans un premier temps, à l'aide d'analyses de sol (laboratoire Galys) et d'outils d'évaluation de la qualité biologique du sol, le type de matière organique optimal à apporter avant l'implantation des cultures. Dans un second temps des observations régulières sur chaque site ont permis de suivre l'évolution des cultures et du sol.

Un nombre important d'indicateurs de la qualité du sol ont été réalisés tous les 2 mois sur chaque site au cours de la première année. Cela nous a permis de sélectionner un nombre plus restreint d'indicateurs qui nous ont semblé essentiels et complémentaires à la compréhension du fonctionnement d'un sol maraîcher. La deuxième année ces indicateurs ont servi à établir les diagnostics initiaux et finaux de chaque parcelle.

De nouveaux outils de mesure de la teneur en azote et/ou en potasse, dans le sol et dans la plante ont également été utilisés : une pince optique Dualex (Force-A) qui calcule un indice (Nitrogen Balance Index) à partir des taux en chlorophylle et flavonoïdes de la feuille et des lecteurs portables Laquatwin (Horiba) pour mesurer les ions NO_3^- et K^+ dans la solution de sol et le jus pétiolaire.

2. Matériel et méthode

2.1 Facteurs et modalités étudiées

Deux sites sont étudiés pour tenir compte des spécificités des différents systèmes légumiers dans la région : un site en culture sous abri (production de Solanacées) et un en culture de plein champ (production de carotte).

Site	A. Sous abri	B. Plein champ
Commune	Graveson	Cadenet
Cultures	Rotation Solanacées / Culture d'hiver	Carottes de plein champ
Conduite	AB	conventionnel
	Tunnel plastique 8m	Plein champ

Pour ces deux sites, deux parcelles sont suivies sur la culture principale (carotte et poivron), en tenant compte de la rotation culturale. Les parcelles sont identifiées A1, A2 et B1, B2.

2.2 Observations et mesures

Au cours des deux années du projet, de nombreuses mesures sont effectuées sur chaque site afin de caractériser au mieux l'évolution de chaque parcelle. Le tableau 1 reprend l'ensemble des suivis réalisés ainsi que leurs objectifs et les références pour leur mise en œuvre.

Les protocoles relatifs à l'ensemble des indicateurs de qualité du sol font référence aux fiches indicateurs publiées dans le cadre de ce projet.

Tableau 1: Indicateurs mesurés sur chaque site d'essai

Type d'analyse	Indicateurs	Objectif de l'indicateur	Fréquence d'analyse	Références
Indicateurs qualité du sol	Densité apparente	Calcul de la porosité, résistance à la pénétration des racines, structure du sol	Tous les 2 mois	USDA, 2001. Soil quality test guide
	Teneur en eau	Donnée informative. Permet le calcul de l'infiltration, respiration, ...		USDA, 2001. Soil quality test guide
	Respiration	Activité biologique du sol		Woods end research, 1997. Guide to Solvita testing and managing your soil
	Slack test	Evalue la tenue des agrégats		Herrick et al, 2001 Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations
	Infiltration	Structure du sol, capacité d'infiltration		Test Beer Khan
	Ver de Terre	Qualité biologique du sol	1 fois par an	Observatoire Participatif des vers de Terre, Test à la bêche
	Sachets de thé	Activité biologique, vitesse de dégradation des éléments	1 fois par an	Tea Time4Science, Protocole Tea Bag Index
	Test bêche	Structure, activité biologique, caractéristiques physiques du sol	Environ 1 fois par an	Protocole adapté ISARA, Götting
Analyses labo	Analyse complète Galys	Analyse physique, chimique et biologique précise du sol	1 fois en début et 1 fois en fin de projet	Laboratoire Galys
	Analyse fractionnement de la matière organique	Qualité biologique du sol, fonctionnement du sol		Laboratoire VG'Ter
Suivi de la culture	PILazo®	Suivi du taux de nitrate dans la plante	1 fois par semaine pendant la culture	Protocole CTIFL
	Dualex			Protocole APREL
	Nitratest	Suivi du taux de nitrate dans le sol		Protocole APREL
	Suivi phénologique	Suivi du bon développement de la culture	Tout au long de la culture	Protocole APREL
	Rendement		Rendement global fin de culture	Conseiller ou producteur
	Relevé épidémiologique	Notation de la présence ou absence de maladies ou bioagresseurs	1 fois par semaine	Protocole APREL
	Irrigation	Gestion et pilotage de l'irrigation	Tout au long de la culture	ARDEPI
	Suivi météorologique	Optimisation de la culture		CIRAME

- Organisation et description des mesures

Une première série d'analyses physico-chimiques réalisée par le laboratoire GALYS permet de déterminer la texture du sol, la richesse en éléments minéraux, la teneur en matière organique (MO) et la taille de la CEC notamment.

Ces données permettent de mieux mettre en évidence l'origine minérale du sol ou par exemple ses capacités à retenir ou non des apports minéraux. Des données telles que le pH peuvent également permettre d'identifier des difficultés d'absorption de certains ions par la plante. Ainsi pour chaque sol nous avons pu définir ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques révélées par l'analyse. La mesure du fractionnement de la matière organique permet d'apporter une information supplémentaire au taux de MO total. Le pourcentage de MO labile (facilement décomposable par le pool bactérien du sol) est un bon indicateur de l'activité biologique du sol.

Les indicateurs de qualité du sol permettent de mieux comprendre la dynamique et le fonctionnement des sols observés. Ils sont alors utilisés en complément des analyses laboratoire.

En 2018, l'objectif était d'identifier une série d'indicateurs terrains qui soient simples d'utilisation, répétables, complémentaires, et, dans la mesure du possible, bénéficiant de références d'interprétation. Après avoir sélectionné les indicateurs, ceux-ci ont été évalués tout au long de la culture.

En 2019 ces indicateurs ont été utilisés avec un objectif de diagnostic des parcelles avant et après l'implantation des cultures. Ainsi sur chaque parcelle nous avons mis en œuvre :

- l'évaluation de la teneur en eau et de la densité apparente du sol

Ces deux mesures sont issues des protocoles de l'USDA. Pour la densité apparente, un volume de sol précis est prélevé sur la parcelle. Il est par la suite pesé, puis séché. La différence entre le poids sec et le poids frais permet d'estimer la teneur en eau de l'échantillon. Ces données vont ensuite être utilisées dans le calcul de la respiration microbienne ou de l'infiltration de l'eau notamment.

- le Slack test pour la tenue des agrégats,

Le Slack test permet d'évaluer la tenue des agrégats du sol une fois immergés. Ainsi des mottes de sol d'environ 3 cm de diamètre sont prélevées sur la parcelle puis séchées. Elles sont ensuite plongées dans l'eau et on évalue le temps que met la motte à se décomposer. Chaque temps de décomposition est relatif à une note de 0 à 6 : 0 (agrégats très friables) à 6 (agrégats liés).

- le test d'infiltration de l'eau Beer Khan

La méthode utilisée pour l'infiltration de l'eau est la méthode de Beer Khan. Un cylindre est enfoncé dans le sol pour permettre d'apporter un volume d'eau connu sur une surface de sol précise. Ce test s'accompagne d'une mesure de la teneur en eau du sol et de la densité apparente. La mesure du taux d'infiltration s'effectue avec deux applications d'eau successives correspondant à la première et deuxième infiltration sur la figure 9. La première infiltration permet de saturer la zone de mesure et ainsi d'obtenir une teneur en eau proche de la capacité au champ du sol. Sur des sols déjà très humides ou très compacts une seule mesure d'infiltration peut suffire.

- le test bêche à chaque début et fin de culture

Le test bêche et le mini-profil de sol permettent de diagnostiquer directement sur le terrain l'état de structure du sol, mais aussi son fonctionnement, la présence d'activité biologique, le développement racinaire, les zones de tassement, ou encore les traces d'hydromorphie.

- Des comptages de vers de terre

En début de projet, le premier protocole utilisé était le test moutarde développé par l'OPVT (Observatoire Participatif des Vers de Terre). Cependant il nous a semblé que ce test sous-estimait le nombre de vers de terre sur les parcelles. Nous avons donc choisi d'utiliser le protocole de comptage vers de terre test bêche mis en place par l'OPVT. Six bêchées sont prélevées sur la parcelle, puis effritées pour en extraire les vers. Ces derniers sont alors dénombrés et classés en fonction de leur catégorie écologique : épigés, anéciques et endogés.

- les tests Solvita® pour la respiration microbienne et l'activité biologique

Pour le test respiration Solvita®, trois échantillons de sol sont prélevés à 15 cm de profondeur à chaque date. Les échantillons sont placés dans un bocal hermétique dans lequel on dispose une bandelette de gel colorimétrique qui réagit à de faibles teneurs en CO₂.

La lecture de la bandelette se fait après 24h d'incubation. Il est alors possible de calculer deux valeurs : la respiration au champ et la respiration standardisée. La respiration au champ est fonction de la température du sol et de la teneur en eau au moment de l'échantillonnage. La mesure standardisée permet de faire abstraction de ces variations en standardisant la mesure à une température de 20°C et une teneur en eau de 60%WFPS (Water Filled Pore Space). La mesure standardisée peut permettre une comparaison de sol à des conditions d'humidité et de température différentes. La mesure au champ permet d'avoir une idée de ce qui se passe réellement sur la parcelle en fonction des conditions extérieures.

- Sachets de thé

Afin d'évaluer l'activité biologique du sol, une deuxième méthode a été utilisée : l'observation de la dégradation de sachets de thés selon le protocole Tea Bag Index.

La méthode des sachets de thé est une méthode peu coûteuse et standardisée permettant de mesurer la vitesse de dégradation de la matière organique. La méthode consiste à enfouir deux types de thé : du thé vert et du thé rooibos. Ces 2 thés ont des C/N très différents : 12 pour le thé vert et 43 pour le rooibos. Selon les types de sol les deux thés ne vont pas se dégrader à la même vitesse. La quantité de thé vert décomposé reflète la capacité du sol à minéraliser des matières organiques facilement décomposables, permettant de fournir des nutriments à une culture sur une brève période. A l'inverse, la quantité de rooibos décomposé permet d'estimer la capacité du sol à minéraliser des matières plus difficilement décomposables, servant à alimenter la culture sur le long terme.

Les résultats peuvent être interpréter de plusieurs manières :

- o Calcul du taux de dégradation (en mg par jour)
- o Calcul du pourcentage de décomposition
- o Calcul d'indice de minéralisation (k) ou d'humification (S)

Ainsi un S élevé indique un stockage important et peu de minéralisation alors qu'un S faible indique un faible stockage de la matière organique fraîche.

Le coefficient k révèle une forte minéralisation secondaire et un risque de dégradation du stock d'humus. A l'inverse, un k trop faible est synonyme d'une faible minéralisation secondaire et un risque de surstockage de la matière organique.

En 2018, un lot de sachets de thé avait été disposé dans les deux parcelles.

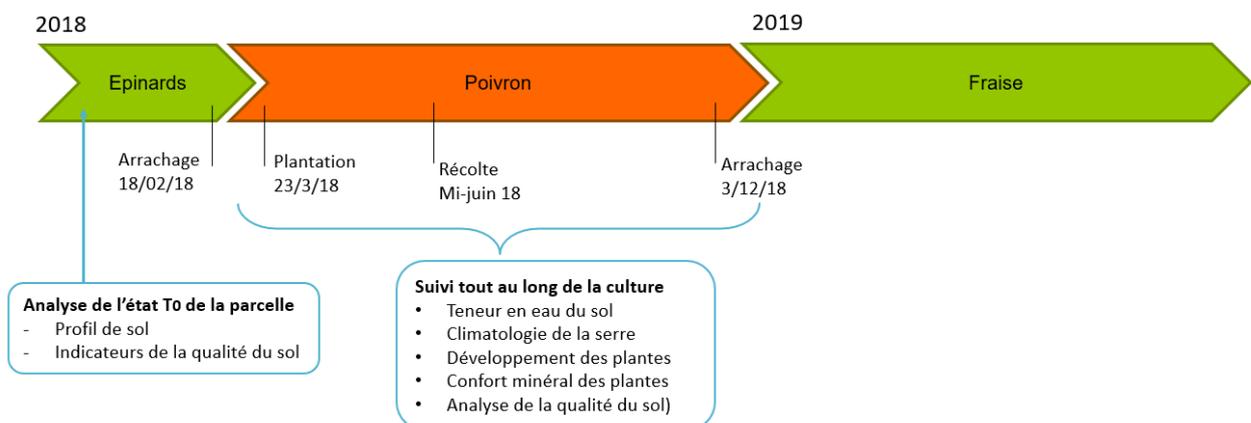
En 2019, des sachets ont été disposés uniquement dans la parcelle sous abris, afin de tester différentes périodes d'incubation. Ainsi chaque mois dès l'implantation de la culture, trois lots de sachets (vert et rouge) ont été enterrés puis retirés après 90 jours comme préconisé par le protocole (Tea bag index, <http://www.teatime4science.org>). Trois lots de sachets ont également été laissés durant toute la période de culture.

3. Site A : Culture sous abris

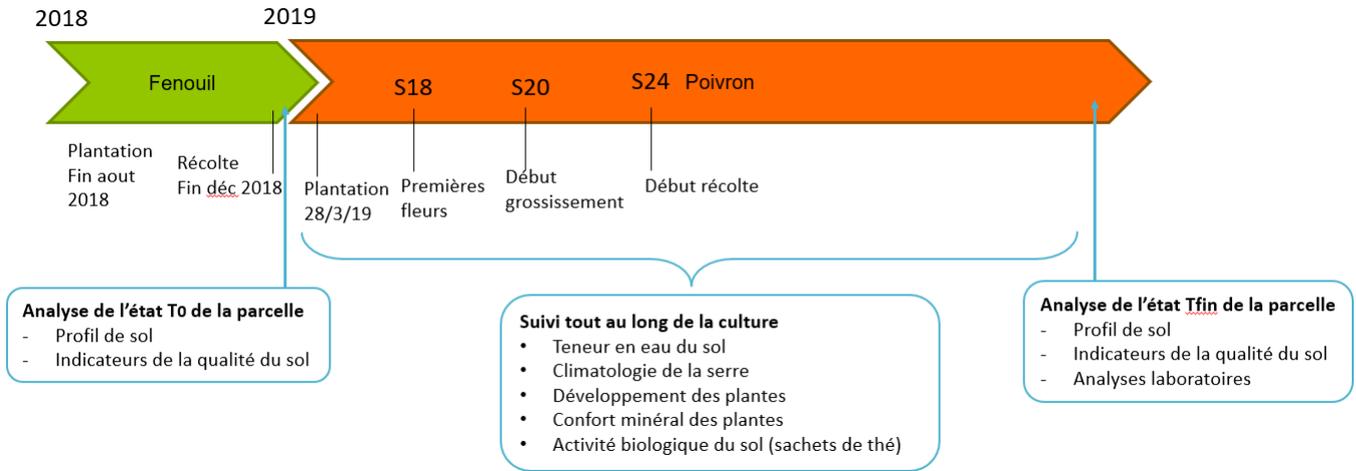
3.1 Contexte

Le premier site étudié est une exploitation en Agriculture Biologique à Graveson, dans les Bouches du Rhône (13). Sur ce site 2 tunnels ont été suivis (Tunnel A1 et A2) pour suivre la culture principale de poivron au sein des rotations mises en place par le producteur. Ce site a été suivi en partenariat avec la Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône.

Tunnel A1 :



Tunnel A2 :



3.2 Campagne 2018 – suivi tunnel A1

3.2.1 Analyse T0 de la parcelle

- Interprétation des analyses laboratoire

Texture	
Type de sol	Texture calcaro-argileuse
Argile	27%
Limons fins	37%
Limons grossier	17%
Sables fins	13%
Sables grossiers	6%
Statut Acido Basique	
pH eau	8.5
PH KCL	8.1
Calcaire total	301
(Ca+Mg)/CEC	527%
Etat organique et biologique	
Matière organique	28,44 g/kg
Carbone organique	16,44 g/kg
Azote total	1,70 g/kg
C/N	9.7
Activité biologique	2/5

ÉQUILIBRE DES CATIONS DANS LA CEC

Ca	65.6%
K	6.8%
Mg	25.0%
Na	2.6%
H	0.0%
Total : 100.0%	

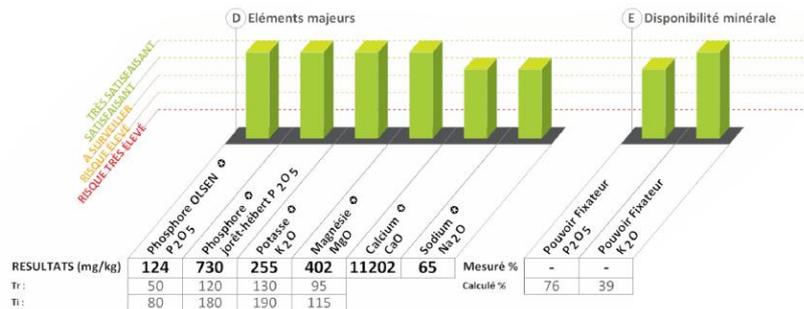
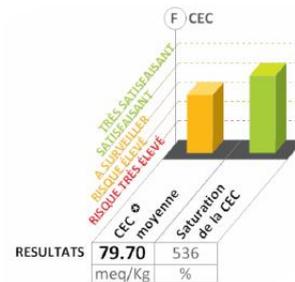
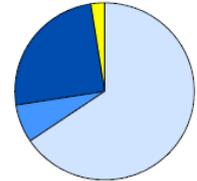


Figure 1 : Extraits des résultats obtenus suite à l'analyse physico chimique de la parcelle A1 (réalisée par Galys)

- Fractionnement de la matière organique (analyse réalisée par VG'Ter)

	Valeur
Matière organique totale (MOT%)	2,72%
Carbone organique totale %	1,58%
Carbone organique totale (g/Kg MS)	15,8
Carbone organique labile (g/Kg MS)	0,47
% Matière organique labile (% MOT)	3,00 % (niveau souhaitable 2,6 à 7,6%)

- Caractéristiques physiques

Ce sol a été formé par les alluvions de la Durance (galets). Il a une texture calcaro-argileuse et les limons fins dominant sur les limons grossiers et les sables fins. C'est un sol très peu sensible au tassement mais qui reste difficile à travailler dans des conditions trop séchantes ou trop humides. La forte proportion de particules fines permet une bonne rétention des éléments minéraux et de l'eau. C'est un des points forts de ce sol (20% d'argile et faible % de cailloux). Le sol est assez profond et limité par une couche de galet à environ 1m. Le calcaire est omniprésent (65.6% de la CEC), ce qui peut perturber l'activité microbienne du sol.

- Caractéristiques chimiques

La capacité d'échange cationique (CEC) est égale à 8 meq/100g de sol. C'est une bonne CEC mais le calcaire est fortement dominant. Les ions H⁺ vont alors avoir du mal à se fixer sur le complexe argilo humique et le sol va avoir tendance à être très basique (pH=8,5). Une carence en H⁺ va aussi se traduire par une diminution des échanges H⁺/K⁺ et donc une libération plus faible de K⁺ dans la solution de sol. Si le K⁺ est moins disponible cela peut entraîner des carences marquées dans les plantes. Un pH trop basique va avoir une forte influence sur la disponibilité des ions en solution mais peut aussi entraîner des dysfonctionnements des populations microbiennes.

La teneur en magnésium est aussi un peu élevée par rapport à la potasse et peut créer des concurrences de disponibilité

L'apport de MO (matière organique) animale, le soufre, l'ammonium et certains couverts végétaux peuvent augmenter la quantité d'H⁺ et corriger cet équilibre. A l'inverse, un apport de masse de déchets verts aura tendance à oxygéner le sol et entrainera une consommation des ions H⁺.

- Caractéristiques biologiques

Le C/N proche de 10 traduit une minéralisation insuffisante. Le stockage de carbone est trop important. Il sera nécessaire d'augmenter l'activité microbiologique de ce sol et la consommation de carbone au niveau des racines. Une MO labile élevée permettra une bonne activité des microorganismes. Ici la MO labile est égale à 3%, ce qui est un bon niveau, mais légèrement surestimée par la présence des racines d'épinard dans l'échantillon.

- Profil de sol

Le profil a été effectué selon la méthode du test à la bêche et la méthode Görbing.

L'observation de la surface révèle une faible présence de turricules et très peu de porosités visibles. Il y a également une légère croûte de battance.

Deux horizons se distinguent :

- horizon 0-15 cm = couche arable de travail du sol. Agrégats effrités, poreux se désagrégant sous de faibles pressions et de taille <0.5mm.
- horizon 15-30 cm = horizon plus souple. Agrégats à fragment dur de taille 5 à 10 cm.

On observe un changement abrupt de densité entre les deux horizons. Au niveau de la porosité on observe très peu de galeries mais quelques trous ne correspondant pas à une activité lombricienne. Les racines observées sont légèrement déformées avec des racines plus fines en bas qu'en haut. Il y a très peu d'obstacles face aux racines, le développement du feutre racinaire est satisfaisant. Il y a très peu de matière organique présente en décomposition, uniquement quelques restes de racines décomposées.



Figure 2: Profil de sol, test bêche

On ne voit pas de reste d'engrais ou d'amendement. La matière organique semble se décomposer fortement dans le sol. A environ 35cm de profondeur, on observe un horizon composé de gley et de rouille, correspondant à un horizon d'humidité assez permanent (stockage d'eau).

Le problème majeur identifié par le profil est le manque de macroporosité et de galeries. On note également peu de signes de vie biologique et de macrofaune. Dans la partie arable, les agrégats poreux se désagrègent facilement, résultat que l'on retrouve au Slack test (voir ci-dessous).

- Conclusion : détermination de la fumure

La première série d'analyses réalisée à la fin de la culture d'épinard et avant la mise de la culture de poivron, a permis de mettre en évidence un sol avec un bon potentiel de production maraîchère, peu sensible au tassement mais nécessitant une activation de la vie microbienne. La tendance basique de ce sol influe sur la disponibilité des éléments minéraux et pourrait à terme pénaliser les cultures. En termes de fertilisation, les objectifs et besoins évoqués étaient les suivants :

Besoins
Du compost animal avec des molécules courtes (compost vieux) pour une libération de N dans la durée et pour que la microfaune soit activée pendant au moins 6 mois
De l'engrais organique pour un apport d'environ 150 U de K
Amendement organique de préférence à minéralisation longue pour une alimentation en N dans la durée

L'ensemble de la fertilisation a été apporté en fumure de fond avant plantation, semaine 11 pour
 - un total de 352 unités d'N, 298 unités de P et 334 unités de K (Tableau 2).

Tableau 2: Unités de N, P, K apportées avant la culture de poivron

Engrais	Type d'apport	Dose	équilibre	Unités		
				N	P	K
Biomazor (engrais organique)	Engrais organique	2,5 T/ha	5-8,5-9	125	213	225
Tourteau de ricin		2,5 T/ha	4,5-1-1	113	25	25
Fumiflor		6 T/ha	1,9-1-1,4	114	60	84
Total				352	298	334

3.2.2 Suivi de la culture

- Conduite générale

Les poivrons ont été plantés sur 5 rangs avec un paillage intégral blanc et un goutteur par rang. L'irrigation s'est faite par aspersion pour la reprise des plants, par tranche de 10 min, puis par goutte à goutte à partir de mi-avril. L'aspersion est utilisée par la suite pour augmenter l'hygrométrie du tunnel. Les premières attaques de puceron apparaissent autour de mi-mai malgré une forte présence d'auxiliaires. L'attaque est maîtrisée et permet de limiter les dégâts sur plantes mais la pression puceron réaugmente fortement mi-juin. On observe toujours une forte présence des auxiliaires et notamment coccinelles et Aphidius. Début juillet les pucerons ont quasiment disparu mais ils reviennent mi-juillet. A partir de fin septembre les plantes commencent à marquer une baisse de vigueur et des chloroses.

Mi-octobre début d'attaque d'oïdium. Une application de soufre est réalisée mais avec une efficacité moyenne. On note aussi quelques attaques de chenilles.

La culture est récoltée jusqu'à fin novembre avec un rendement très satisfaisant d'environ 8 kg/m².

- Fertilisation

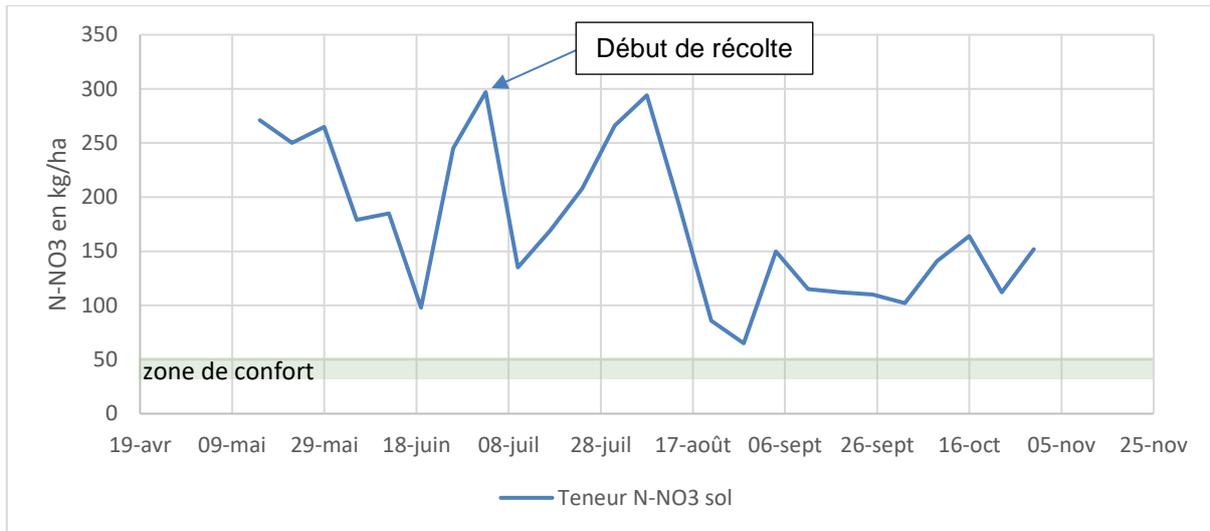


Figure 3: Teneurs en azote du sol (mesures par Nitratest)

Le suivi des teneurs en azote dans le sol au cours de la culture de poivron a montré une situation confortable pour les plantes tout au long de la culture. La zone de confort pour une culture de poivron se situe entre 30 et 50 unités N. La fourniture en azote du sol suite à la fumure de fond est très importante à la plantation. La teneur en azote du sol diminue progressivement jusqu'au 20 juin. On note par la suite 2 pics de minéralisation importants mi-juillet (début de récolte) et mi-août. En fin de culture la teneur en azote du sol reste stable entre 100 et 150 kg/ha.

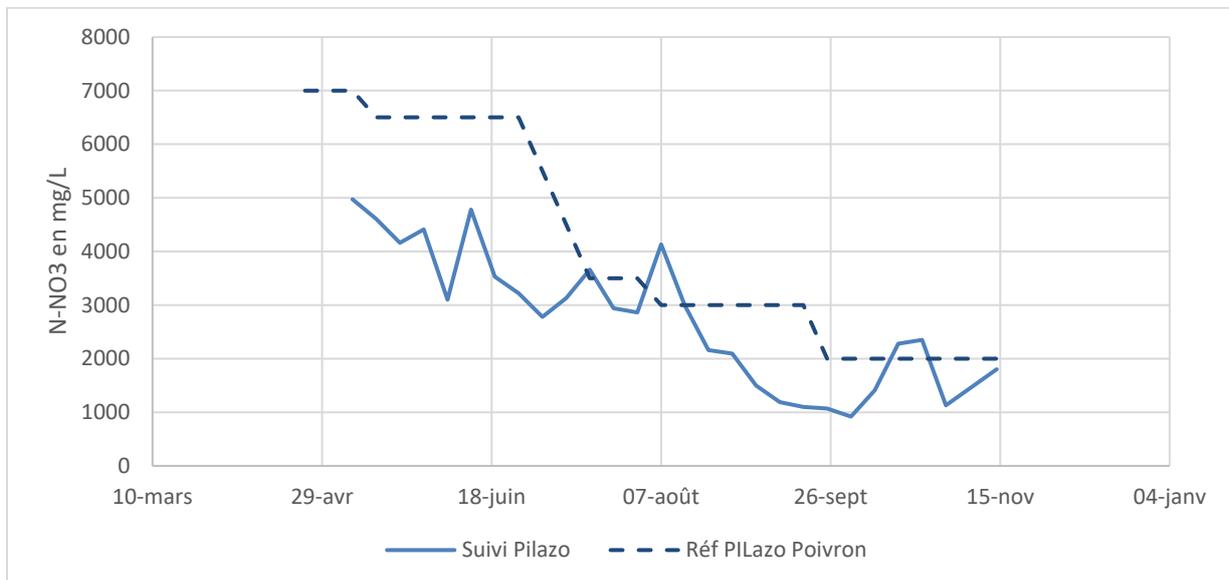


Figure 4 : Suivi de la teneur en azote de la plante, méthode PILazo®

La teneur en azote dans la plante a été suivie selon la méthode PILazo® (Figure 4). Chaque semaine 30 jeunes feuilles adultes de poivron ont été broyées et la teneur en azote du jus pétioleaire a été mesurée au Nitratecheck. Les références utilisées sont les grilles PILazo® du CTIFL. On observe qu'au début de la culture la teneur en azote des plantes est largement inférieure à la référence. Cependant les plantes ne marquent visuellement pas de carence. A partir de début juillet la teneur en azote dans les plantes se stabilise, légèrement en dessous de la courbe de référence. Fin septembre les plantes ont commencé à marquer une baisse de vigueur qui ne semble pas être induite par une carence azotée. Au niveau sanitaire, on a pu voir que les attaques de pucerons et le début des attaques d'oïdium coïncidaient avec des augmentations de la teneur en azote dans la plante. Il est cependant difficile de déterminer si l'augmentation des teneurs en azote a pu favoriser ces attaques ou si, à l'inverse, ces augmentations sont liées à une réaction de défense de la plante suite à ces attaques.

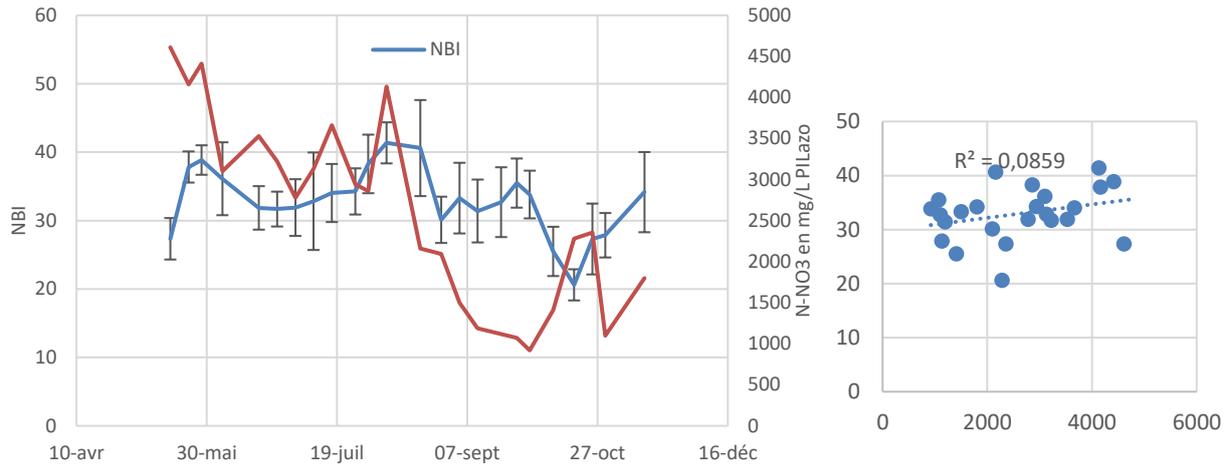


Figure 5: Suivi de la teneur en azote dans la plante, mesure NBI par Dualex et méthode PILazo et coefficient de corrélation

Une pince optique (Dualex, Force A) a également été utilisée. Les teneurs en chlorophylle et flavonoïde mesurées par fluorescence permettent de calculer un indice, le NBI (Nitrogen Balance Index), corrélé positivement au statut azoté de la plante.

La comparaison Dualex/PILazo® a été réalisée précédemment sur tomate (Fertinnowa, 2018) et avait montré des tendances similaires entre les deux méthodes. Ici, les mesures NBI sont très peu corrélées aux mesures PILazo® (Figure 5). De plus on observe une forte variabilité dans les mesures prises avec la pince Dualex. Le stade jeune feuille adulte étant plus délicat à déterminer pour le poivron que pour la tomate cela pourrait expliquer cette variabilité.

○ Conduite de l'irrigation

L'irrigation a été suivie à l'aide d'une sonde capacitive. L'eau est apportée par goutte à goutte et aspersion.

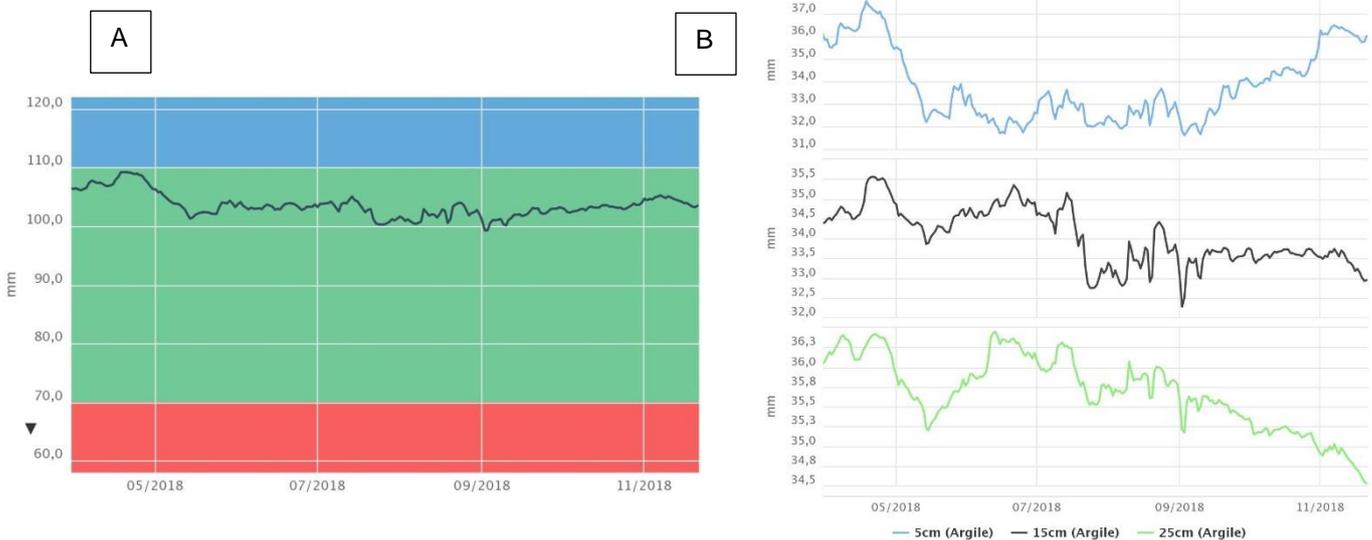


Figure 6 : Suivi de la teneur en eau du sol, cumul horizon 0-25 cm (A), et 3 profondeurs 5, 15 et 25 cm (B)

Les humidités cumulées ont varié entre 110 et 100 mm. La culture a été maintenue dans un confort hydrique. Le suivi des humidités par capteurs montre une bonne utilisation en eau par les plantes jusqu'en profondeur. Les capteurs à 15 et 20 cm permettent de visualiser une tendance à la baisse régulière de l'humidité du sol entre le début et la fin de la culture. Cette baisse est très marquée sur le capteur 25 cm à partir de septembre. Le suivi des irrigations à l'aide des sondes capacitatives Sentek, a permis une bonne gestion des apports d'eau.

Le volume d'eau apporté est de 572 mm selon les notations du producteur. Ce volume est modéré pour une année particulièrement chaude en 2018. L'ensemble des résultats et observations effectués par l'Ardepi sont dans le rapport final Ardepi Orion.

- Indicateurs terrains

L'ensemble de ces indicateurs ont été testés à 5 dates : fin de précédent épinard, plantation des poivrons, début de récolte, pleine récolte et fin de culture.

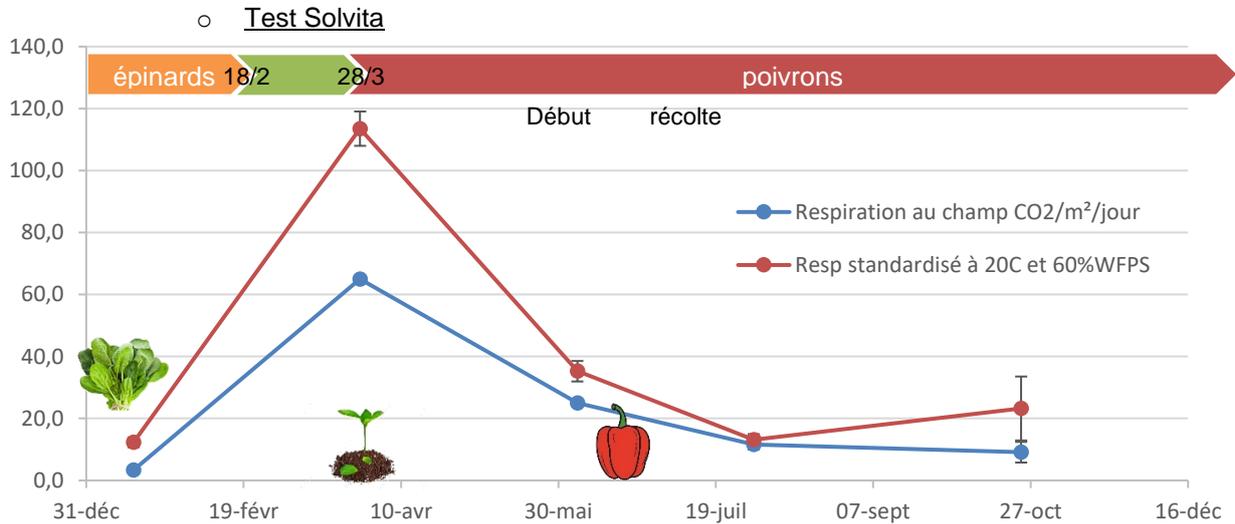


Figure 7 : Evolution de la mesure de respiration (Solvita) (en g de CO₂ par m² et par jour)

Ici, le test respiration Solvita révèle une activité biologique assez faible (3.3g/CO₂/m²/j) en janvier (figure 7). La respiration augmente fortement en avril, suite à l'apport d'amendement organique. Cependant cette activité biologique redescend progressivement pour se maintenir à une activité moyenne tout au long de la culture de poivron (respiration entre 25 à 9g/CO₂/m²/jour). On observe très peu de variations et une bonne homogénéité des mesures malgré un échantillonnage assez faible (3 échantillons par date). La grille colorimétrique reste cependant très large et ne permet pas une mesure vraiment précise de la teneur en CO₂ des échantillons. L'utilisation d'un lecteur colorimétrique électronique permettrait plus de précisions dans la lecture des données.

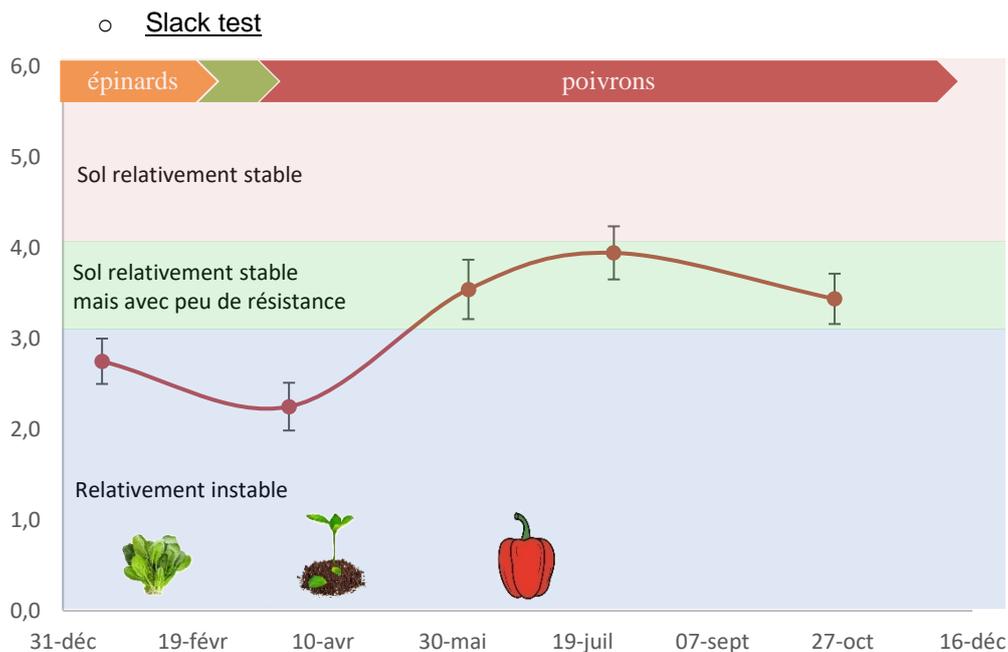


Figure 8 : Résultats issus du test du Slack test (Note de 0 à 6)

Dans ce sol, la tenue des agrégats est moyenne, les mottes se décomposent assez vite dans l'eau. Ce sera donc un sol facilement lessivable. Suite à la plantation des poivrons on observe une stabilisation des mottes mais avec un sol toujours peu résistant aux forts événements climatiques. L'augmentation de la stabilisation peut s'expliquer par la présence des racines de poivrons. Quatre échantillons par date sont prélevés et on peut voir une certaine homogénéité dans les mesures. Les échantillons sont prélevés à 15 cm de profondeur en conservant des mottes « naturelles ». Par la suite des échantillonnages à différentes profondeurs pourraient permettre d'affiner l'expertise de ce sol.

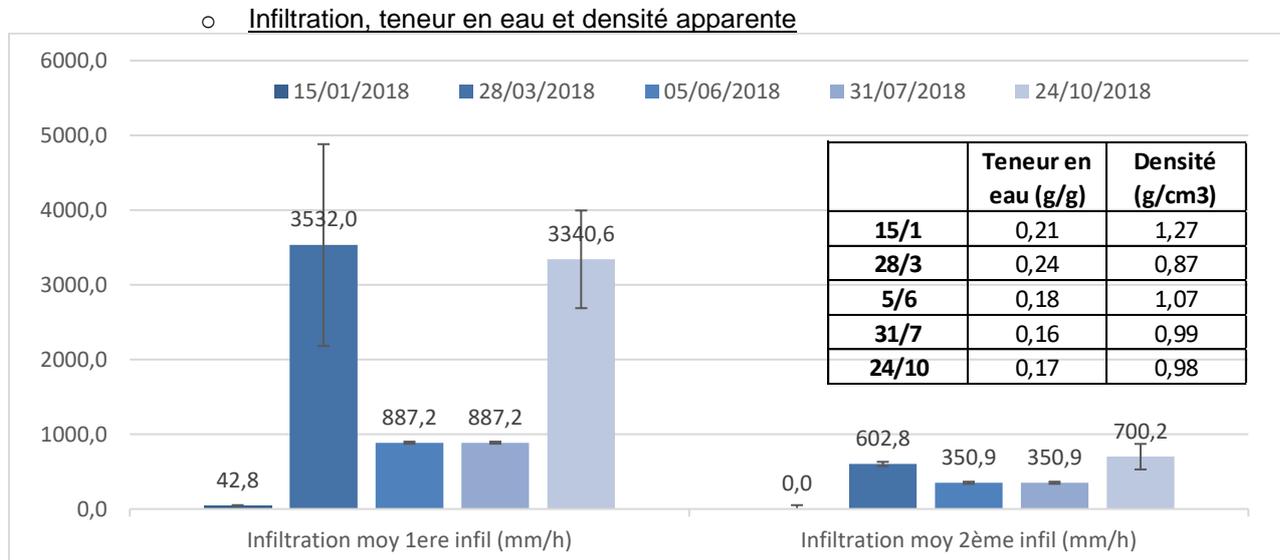


Figure 9 : Evolution du taux d'infiltration, de la teneur en eau et de la densité

Le taux d'infiltration varie fortement entre la première mesure effectuée le 15/01 et la deuxième mesure le 23/03. La teneur en eau entre ces deux mesures reste cependant équivalente (0.21 à 0.24 g d'eau par g de sol). Cette différence peut alors s'expliquer par une compaction plus importante en janvier. En effet, la densité du sol était de 1,27 g/cm³ en janvier et 0,87g/cm³ au mois de mars. Au mois de mars la mesure a été effectuée juste après la plantation des poivrons. La perte de densité du sol est relative au travail de sol effectué.

En été, le taux d'infiltration diminue de manière assez importante et reste stable comme la teneur en eau ainsi que la densité. En octobre, on observe de nouveau une forte variation de l'infiltration, marquée surtout sur la première infiltration. Cette fois il ne semble pas y avoir d'influence ni de la teneur en eau ni de la densité.

Ici on peut voir que les mesures de teneur en eau montrent très peu de variabilité. Le taux d'infiltration quant à lui est beaucoup plus variable selon les mesures, notamment lorsque les valeurs sont hautes. On remarque que les mesures de deuxième infiltration sont plus homogènes. En effet la première infiltration permet d'atteindre la capacité au champ. La deuxième infiltration permet de s'affranchir en partie de la teneur en eau initiale.

En se basant sur les résultats obtenus, ce sol a un taux d'infiltration moyen.

3.2.3 Synthèse en fin de culture

A l'arrachage des poivrons (le 3 décembre 2018), nous avons réalisé un test à la bêche afin d'évaluer l'évolution du sol suite à l'apport d'amendement et à la culture de poivron. Cette évaluation fut aussi l'occasion d'observer le chevelu racinaire de la culture.

Un des changements majeurs entre les deux profils est l'augmentation des macroporosités en surface et des turricules. On note toujours deux horizons distincts cependant la limite entre les deux horizons semble plus estompée. On note un bon développement du chevelu racinaire avec des racines saines marquant tout de même de légers rétrécissements. La culture semble avoir eu un effet positif sur l'activité et la structure de ce sol. Le nombre de vers de terre reste faible mais on observe l'effet positif d'une culture longue sur ce sol.



Figure 10: mini fosse du test bêche

3.3 Campagne 2019 – suivi tunnel A2

En 2019 la culture de poivron s’est faite dans un autre secteur de la même exploitation, à Graveson (13). Ce tunnel a été suivi partiellement en 2018 afin d’avoir un bon aperçu de la typologie de la parcelle avant l’implantation des poivrons. Nous ne présenterons ici que les résultats influençant directement la culture de poivron en 2019.

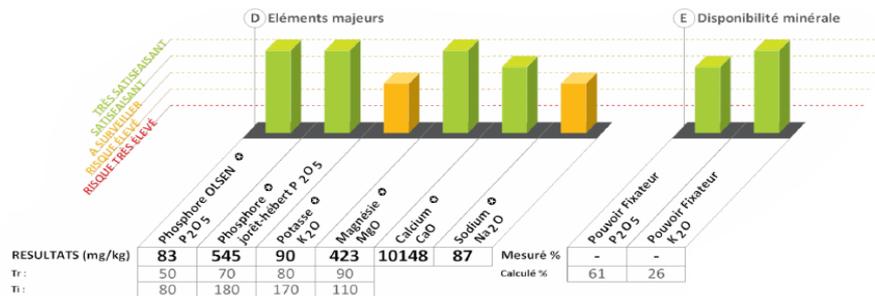
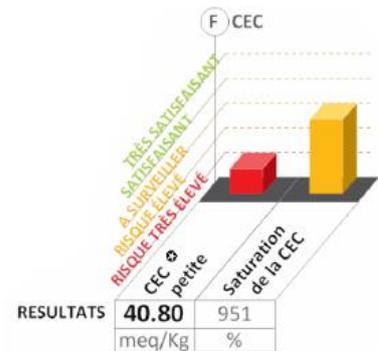
3.3.1 Analyse T0 de la parcelle

En 2018 la parcelle a été cultivée en épinard jusqu’en avril. Une solarisation a été mise en place en été puis une culture de fenouil dès fin août. Au printemps 2019 le producteur a planté sa culture de poivron. De la même façon que pour la première parcelle nous avons dans un premier temps réalisé une analyse préliminaire du sol avant l’implantation de la culture de poivron afin de déterminer la fumure à apporter puis le sol et la culture ont été observés tout l’été.

- Interprétation des analyses laboratoire (analyse réalisée par Galys)

Texture

Type de sol	Texture calcaro-limoneuse
Argile	17%
Limons fins	22%
Limons grossier	19%
Sables fins	34%
Sables grossiers	73%
Statut Acido Basique	
pH eau	8,4
PH KCL	8,3
Calcaire total	380,2
(Ca+Mg)/CEC	939%
Etat organique et biologique	
Matière organique	21,87 g/kg
Carbone organique	12,64 g/kg
Azote total	1,24 g/kg
C/N	10,2
Activité biologique	2/5



- Fractionnement de la matière organique (source : VG'Ter)

	Niveau souhaitable	Valeur
Matière organique totale (MOT%)		2,12%
Carbone organique totale %		1,23%
Carbone organique totale (g/Kg MS)		12,3
Carbone organique labile (g/Kg MS)		0,275
% Matière organique labile (% MOT)	2,6-7,6 %	2,24% (niveau souhaitable 2,6 à 7,6%)

○ Caractéristiques physiques

Les limons grossiers et les sables fins représentent plus de 50% de la texture du sol ce qui entraîne un risque de tassement important et un sol plutôt battant. C'est un sol filtrant (73% sables grossiers) mais sensible à la prise en masse et au tassement, donc à la sécheresse. Il est également sensible à l'asphyxie et risque de se « fermer » facilement. C'est une structure de sol fragile sur lequel il faudrait limiter les passages de roues et le travail du sol. La gestion de l'arrosage peut aussi être un facteur important en privilégiant les micro-arrosages pour ne pas endommager la structure.

C'est un sol moins profond et plus superficiel que le tunnel A1 et donc plus compliqué à exploiter. Le risque de tassement et de prise en masse interdit de laisser le sol nu. Il faudrait le couvrir en permanence par de la végétation.

○ Caractéristiques chimiques

Le pH de 8,4 donne un sol basique. La CEC de ce sol est de 4meq/100g ce qui est assez faible et elle est par ailleurs entièrement remplie par Ca²⁺ et Mg²⁺. Cela peut entraîner des blocages dans la libération du phosphore. La potasse va aussi être un élément limitant de l'alimentation.

○ Caractéristiques biologiques

Le C/N de 10 traduit une activité microbienne insuffisante compte tenu du stock de carbone. L'azote est peu minéralisé. Le taux de matière organique totale est moyen (2,2%). Le taux de MO labile est de 2,24% ce qui correspond à une activité biologique faible.

• Test bêche

Le test bêche a été réalisé à la fin de la culture de fenouil précédant le poivron, le 21 décembre 2018. On observe alors un bon état de surface. Il n'y a pas de croûte de battance et on note la présence de turricules et de macroporosités. Dans les horizons du sol on observe encore assez peu de traces d'activité biologique. Il y a une bonne dégradation des matières organiques et pas de trace d'engorgement.

• Indicateurs terrain

A la même date, les indicateurs terrain ont révélé un sol relativement compact mais dans lequel l'eau s'infiltrait facilement. L'activité biologique est faible et aucun ver de terre n'a été trouvé.

Tableau 3 : Résultats indicateurs de qualité du sol

	Respiration au champ CO2/m ² /jour	Respiration standardisée à 20C et 60%WFPS	Infiltration moy 1ere infil (mm/h)	Densité apparente (g/cm ³)	WFPS (%)	EC (dS/m)	Teneur en eau (g/g)	Teneur en NO3-N (g/kg)	Slake test	Vers de terre (Vers/m ²)	Température sol (Celsius)
21/12/18	0,4	2,1	6680,6	1,2	36,3	1,4	0,16	219,9	2,4	0	5°C
Interprétation	faible		rapide	compact					instable	faible	

• Conclusion : détermination de la fumure

Cette première série d'analyse permet de mettre en évidence un sol qui a une relativement bonne réserve en humus mais dans lequel l'activité biologique est faible. Au vue de la taille de la CEC il n'est pas préférable d'avoir recours à des apports de masse d'amendement organique.

Besoins
Du compost animal pour apporter de la MO active qui doit augmenter l'activité bactérienne.
De l'engrais organique à dominante de potasse. Apport d'environ 150 U de K
Amendement organique pour une alimentation en N dans la durée (minéralisation longue)

La majeure partie de la fertilisation a été apportée via la fumure de fond en semaine 11. Pour un total de 352 unités d'N, 298 unités de P et 334 unités de K.

Tableau 4: Unités de N, P, K apportés avant la culture de poivron

Engrais	Dose	équilibre	Unités		
			N	P	K
Biomazor	2,5 T/ha	5-8,5-9	125	213	225
Fumiflor	6 T/ha	1,9-1-1,4	114	60	84
Tourteau de ricin	2,5 T/ha	4,5-1-1	113	25	25
Total			352	298	334

3.3.2 Suivi de la culture

- Conduite générale

La plantation des poivrons a eu lieu le 28 mars 2019. La culture s'est dans l'ensemble bien développée. La floraison a débuté fin avril et la récolte autour du 10 juin. Il n'y pas eu de gros problèmes sanitaires à part quelques foyers de pucerons localisés. Les conditions climatiques caniculaires en juillet ont ralenti le développement des plantes et la production de fruit. On note un rendement final faible de 6,7 kg/m², inférieur aux années précédentes.

- Teneurs en N et K

Les mesures de la teneur en azote du sol ont démarré une semaine après l'implantation de la culture de poivron (Figure 11). Les solutions de sol ont été mesurées à la fois au Nitratecheck et au Laquatwin. Le sol est dès le départ correctement pourvu en azote. La teneur en azote du sol reste relativement élevée jusqu'à la semaine 21. 3 pics de minéralisation sont observés en : mi-juin, début août et début novembre. Mise à part ces pics de minéralisation, la teneur en azote du sol est stable et se situe à un niveau plutôt faible en fin de culture.

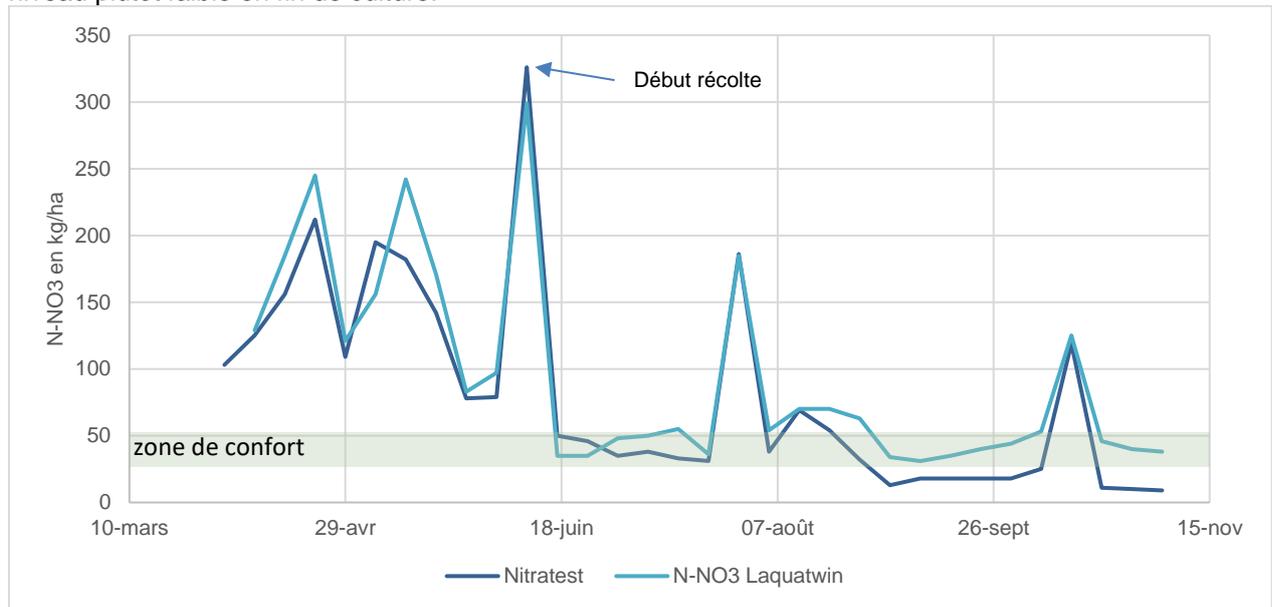
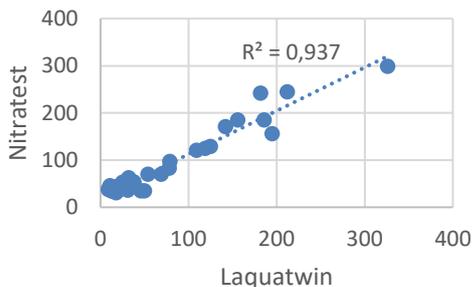


Figure 11 : Teneurs en azote du sol (en N-NO3 en kg/ha)



Les deux outils de mesure ont une forte corrélation ($r^2=0,937$). Les valeurs sont donc très proches. Cependant lorsque les valeurs sont faibles, on observe une plus grande disparité entre les mesures, qui peut être lié à l'échelle de sensibilité de l'appareil.

Un deuxième lecteur Laquatwin permet de mesurer la potasse contenue dans la solution de sol (Figure 12). Les teneurs en K du sol semblent élevées en début de culture et diminuent progressivement du fait essentiellement de la consommation des plantes. Il est difficile d'avoir des références quant à la consommation journalière des poivrons en K. On sait qu'un poivron va consommer environ 300 unités de potasse. Le producteur ayant apporté 310 unités, on peut supposer qu'il n'y aura pas de carences.

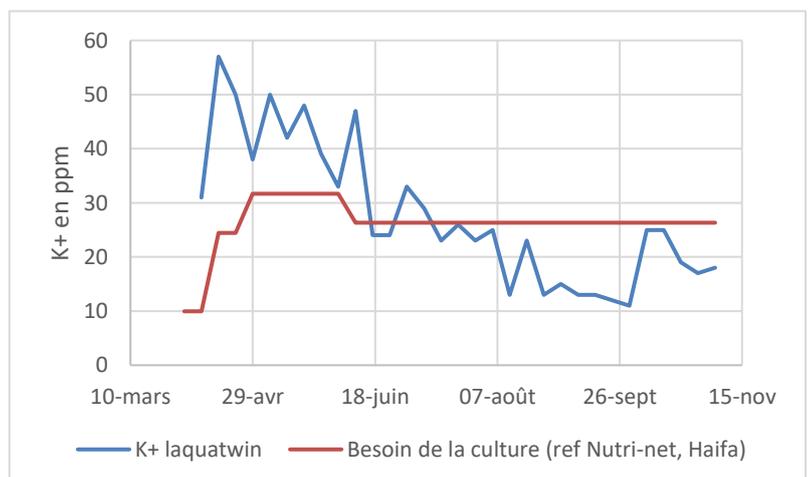


Figure 12 : Teneurs en K du sol (ppm)

Sur la figure 11 sont présentées des références fournies par Haifa sur leur application Nutri-net, quant aux besoins journaliers d'une culture de poivron en sol. Ces références sont à considérer avec précaution, mais si on se base sur celles-ci on constate que la culture est en confort tout au long de son développement végétatif et de la floraison puis en légère carence pendant la mise à fruit et la récolte. Visuellement les plantes n'ont pas marquées de réelles carences. Dans la plante, les teneurs en azote sont comparables aux références CTIFL en tout début de culture.

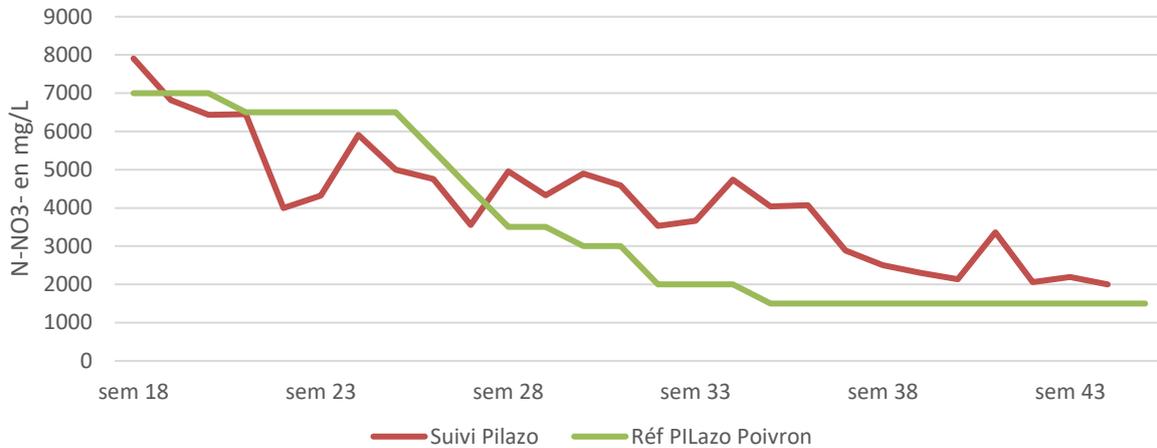


Figure 13: Teneur en azote dans la plante, suivi PILazo®

On observe une chute des teneurs en azote dans la plante juste avant le début de récolte puis la courbe se maintient en zone de confort jusqu'à la fin de la culture. Visuellement les plantes n'ont marqué aucune carence.

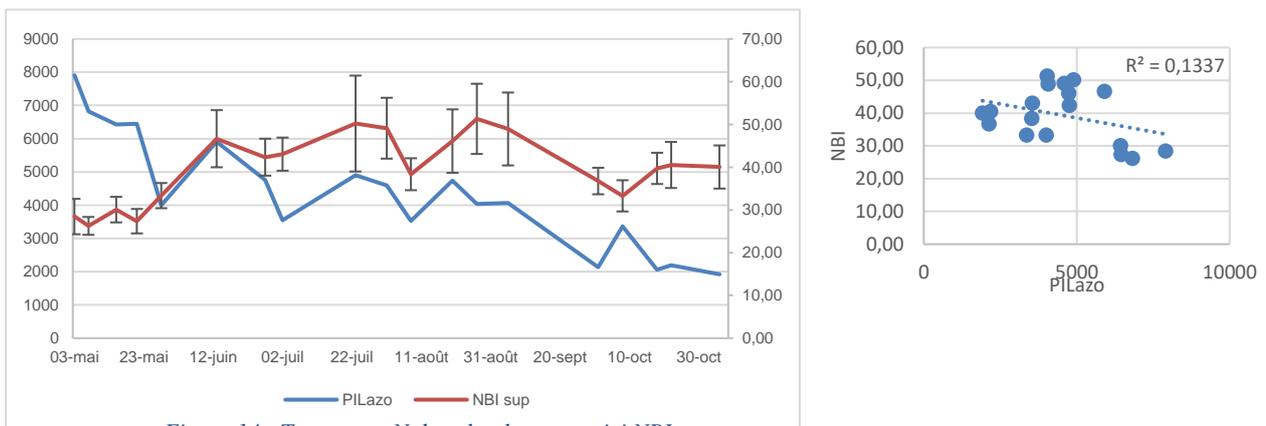


Figure 14 : Teneurs en N dans la plante et suivi NBI

Comme pour l'année précédentes, des mesures ont été réalisées avec Dualex® tout au long de la culture et comparées aux valeurs obtenues avec la méthode PILazo®. Comme en 2018, on n'observe pas de corrélation entre ces deux méthodes ($r^2=0,133$). Ces deux outils ne mesurent pas exactement les mêmes mécanismes dans la plante et il est pour le moment difficile d'établir un diagnostic avec la pince Dualex® car les références par culture sont encore trop peu nombreuses.

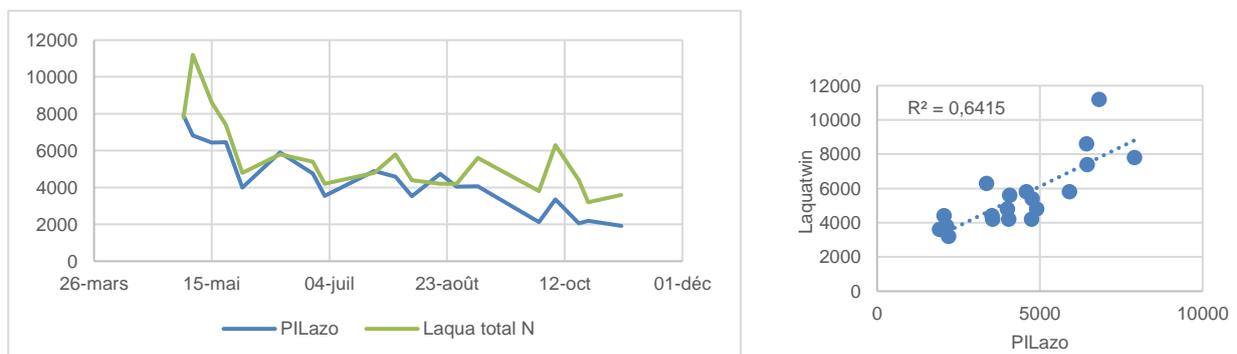


Figure 15 : Teneurs en N dans la plante

Les mesures de N dans les jeunes feuilles adultes ont été réalisées parallèlement avec les outils : Laquatwin et Nitracheck. Ici la corrélation entre les deux méthodes de mesure est plus forte ($r^2=0,641$). Le Laquatwin semble réagir plus fortement à des variations d'azote dans la plante.

Il a également été possible de suivre l'évolution de la teneur en potasse dans la plante avec le Laquatwin. La potasse serait un facteur d'amélioration de la qualité des fruits en poivron. Ici, en se basant sur les références publiées par Hochmuth en 2012, la teneur en potasse est très élevée dans les pétioles. Cependant ces références sont issues d'analyses dans des conditions de culture et des variétés très différentes de celles étudiées ici, elles sont donc à considérer avec prudence.

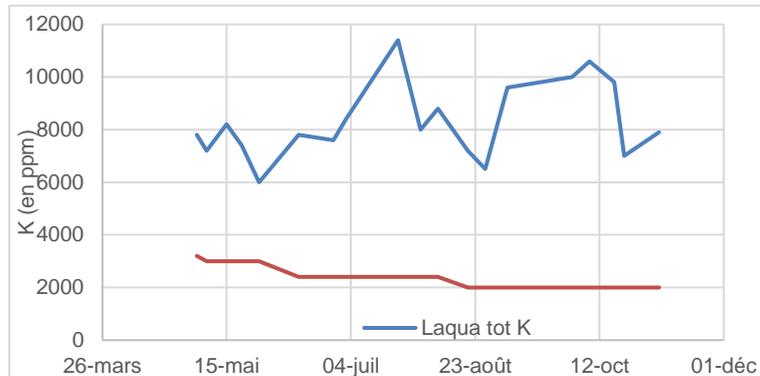


Figure 16: Teneur en K dans la plante, ref Hochmuth, 2012

- Activité biologique du sol

L'activité biologique du sol a été évalué avec la méthode des sachets de thé.

- Taux de dégradation (en mg/jour) et % de décomposition

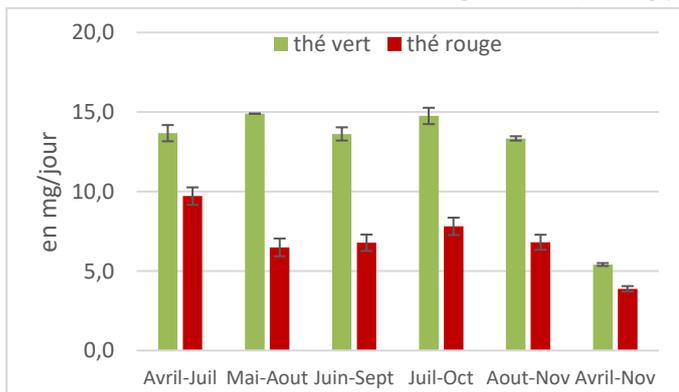


Figure 18 : Taux de dégradation pour chaque type de thé

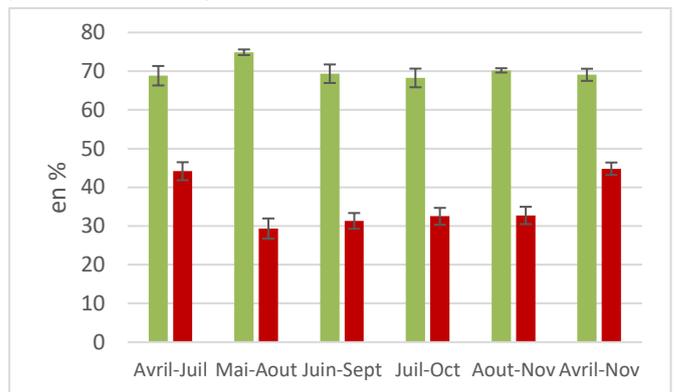


Figure 17: % de décomposition pour chaque type de thé

Il existe encore peu de références en maraichage et dans les conditions du Sud-Est de la France sur l'utilisation de la méthode des sachets de thé. Ici on peut voir que la capacité du sol à minéraliser des matières plus difficilement décomposables est plus forte sur la période avril à juillet. En effet c'est sur cette période que le thé rouge s'est le plus dégradé (45% de dégradation). Sur les autres périodes on observe environ 30 à 32 % de dégradation correspondant à un taux de 6 à 8mg de thé dégradé par jour d'incubation. La dégradation du thé vert est plus stable entre chaque période d'incubation. Elle oscille entre 69 et 75%, ce qui correspond à des taux de 13 à 15mg de thé dégradé par jour d'incubation.

Si on s'intéresse aux valeurs obtenues après 6 mois d'incubation, on remarque que le taux de dégradation est très faible. Cependant cela est dû uniquement au temps d'incubation qui est plus long. Le pourcentage de dégradation du thé vert est équivalent aux données obtenues au bout de 3 mois. On peut donc supposer qu'au bout de 3 mois la capacité maximale de décomposition du thé par le sol est atteinte. Pour le thé rouge 45% de thé a été dégradé, ce qui est équivalent au pourcentage de dégradation obtenue sur la période avril-juillet. Ainsi, de la même façon que pour le thé vert, on peut considérer qu'au bout de 3 mois la majorité du thé décomposable par le sol est décomposé.

○ Indice d'humification S et de minéralisation k

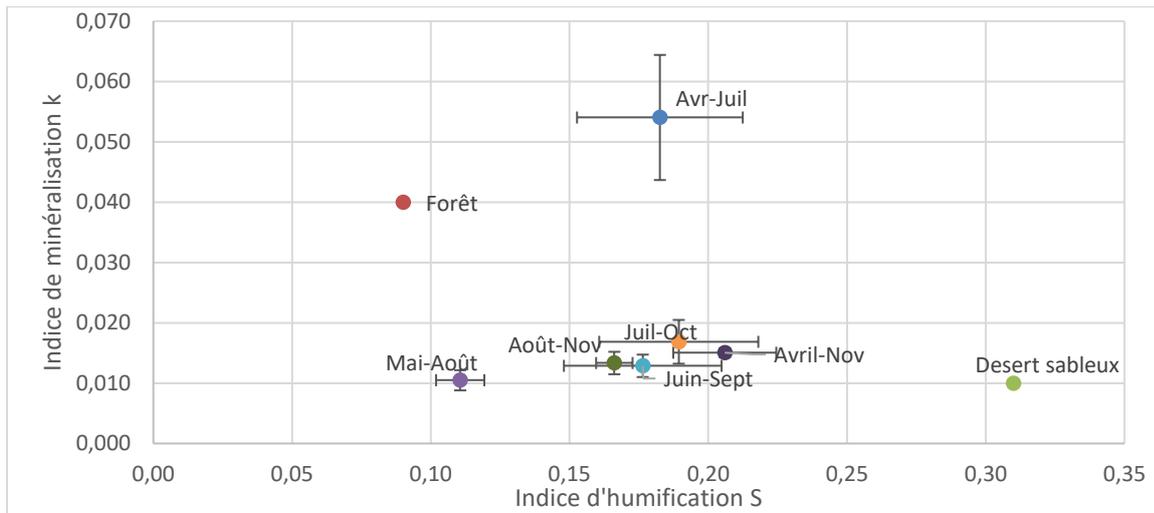


Figure 19: Indice d'humification et de minéralisation

Si on observe les indices de stabilisation et de minéralisation on remarque que pour les périodes d'enfouissement entre juin -septembre et aout-novembre les indices varient peu. Sur la période avril-juillet la minéralisation augmente. Sur la période mai-août l'humification est plus faible.

• Irrigation

Des sondes capacitives Sentek sont positionnées sur la parcelle ainsi que des sondes tensiométriques connectées Weenat afin de tester ce nouveau matériel. L'ensemble des résultats obtenus sont exposés dans le rapport Orion de l'Ardepi.

3.3.3 Conduite climatique

Pour compléter les différentes expérimentations conduites par l'APREL dans la serre de poivrons de Graveson, le CIRAME a installé une station météo de dernière génération, une station Agriscope, conçue et fabriquée par une startup de la région de Montpellier. Cette dernière mesure la température et l'humidité de l'air sous abri ainsi que la température du sol à -10cm. Elle est autonome. La consommation électrique de cette station a été optimisée : elle ne demande pas de panneau solaire, de simples piles suffisent.

Les données collectées sur les capteurs de cette station sont transmises automatiquement, via le protocole SIGFOX sur la plateforme du CIRAME et vont alimenter notre base de données.

L'installation de la station a été effectuée peu de temps après la plantation. Deux saisons ont été couvertes

- 2018 du 25 mars au 2 décembre
- 2019 du 27 mars au 5 décembre

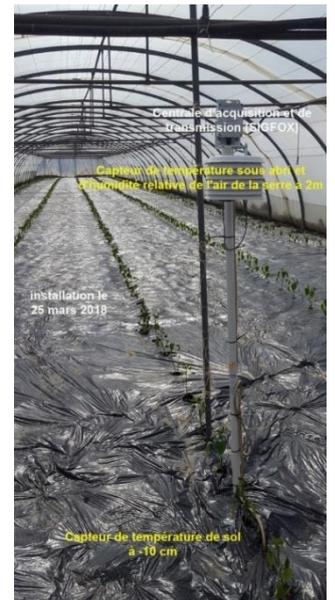


Figure 20: Station météo Agriscope

Entre les deux saisons la station a été arrêtée.

A partir des données collectées toutes les demi-heures sont calculés différents paramètres horaires, quotidiens et mensuels. Les données figurant dans les graphiques concernent des données mensuelles.

Paramètre quotidien	Unités	Mini	Maxi
TEMPERATURE MAXIMALE 06H00(J) - 06H00(J+1)	1/10 DEGRES C	-100	427
MOYENNE DES TEMPERATURES HORAIRES	1/10 DEGRES C	-136	335
TEMPERATURE MINIMALE DU SOL A 10 CM	1/10 DEGRES C	2	246
TEMPERATURE MAXIMALE DU SOL A 10 CM	1/10 DEGRES C	6	293
TEMPERATURE MINIMALE 18H00(J-1) - 18H00(J)	1/10 DEGRES C	-201	400
MOYENNE DES TEMPERATURES EXTREMES (MINI+MAXI)/2	1/10 DEGRES C	-136	335
HUMIDITE RELATIVE MINIMALE	%	8	100
HUMIDITE RELATIVE MAXIMALE	%	8	100
HUMIDITE MOYENNE DES EXTREMES	%	17	100
HUMIDITE MOYENNE DES HORAIRES	%	10	100

Paramètre horaire	Unités	Mini	Maxi
TEMPERATURE INSTANTANEE HORAIRE	1/10 DEGRES C	-250	430
TEMPERATURE DU SOL A 10 CM INSTANTANEE HORAIRE	1/10 DEGRES C	2	293
HUMIDITE RELATIVE INSTANTANEE HORAIRE	%	8	100

Figure 21 : Paramètre climatiques calculés

- Evolution des températures de l'air sous abri

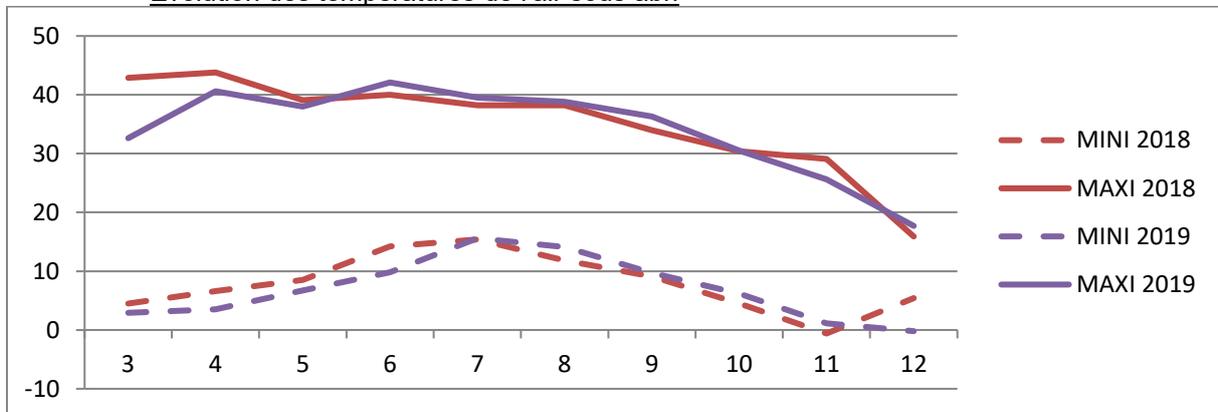


Figure 22: Températures de la serre, 2018 et 2019

Les températures de la serre ont été similaires sur les deux saisons et particulièrement chaudes. Les températures maximales se maintiennent autour de 40°C de mars à juillet et descendent au-dessous de 30°C en octobre (fin de culture).

Les températures minimales ont évolué de 5 à 10 °C jusqu'en juin puis entre 10 et 20 °C de mai à octobre.

- Evolution de la température du sol

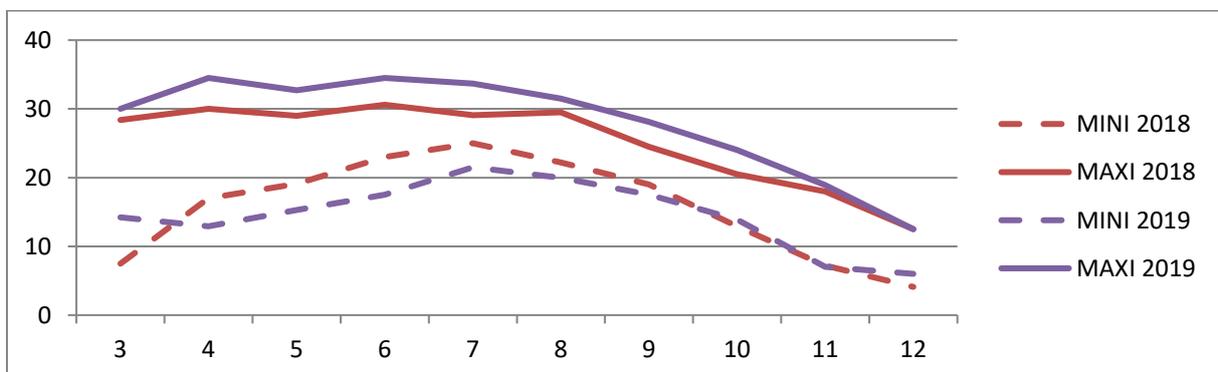


Figure 23: Température du sol, 2018 et 2019

L'amplitude (maxi – mini) de la température du sol à -10cm est restée comprise entre 21 °C en début de saison et 9°C en fin en 2018. Cette amplitude est plus faible en 2019.

La température du sol à -10cm (moyenne des extrêmes) se superpose à la température moyenne de l'air dans la serre tant pour 2018 que 2019.

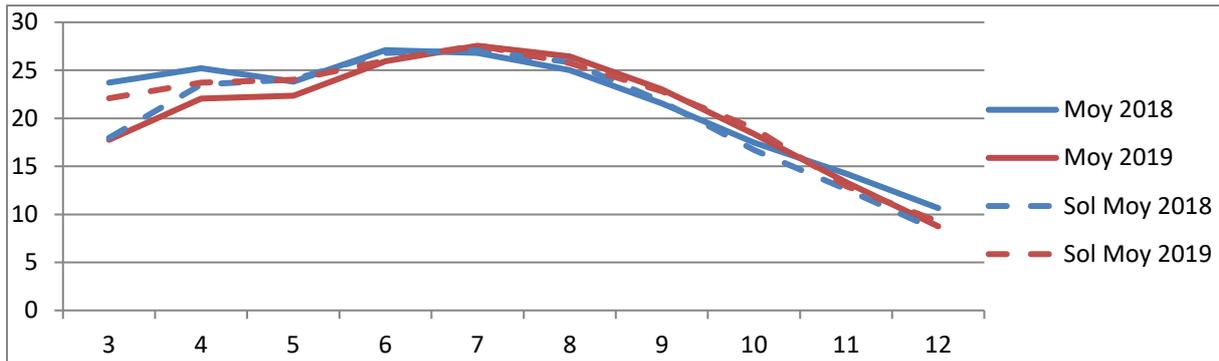


Figure 24 : Moyenne des températures de l'air et du sol

- Humidité relative de l'air

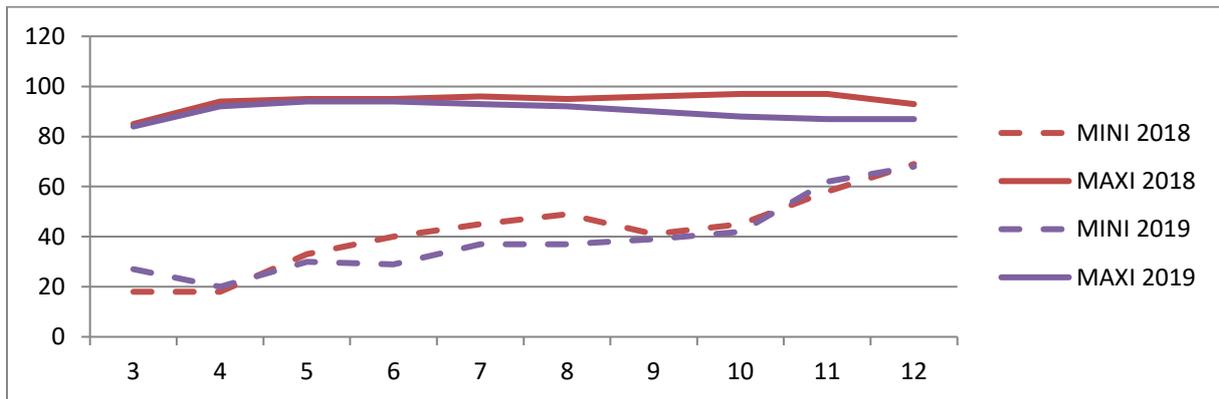


Figure 25: Humidité relative de l'air dans l'abri

Globalement le taux d'humidité de l'air a suivi la même évolution pendant ces deux années. L'ambiance dans l'abri semble avoir été un peu plus sèche en 2019 qu'en 2018, notamment sur la période estivale.

- Diffusion des données

Pour suivre l'évolution de ces paramètres climatiques le Cirame a mis en œuvre une rubrique spécialisée sur leur site internet www.agrometeo.fr

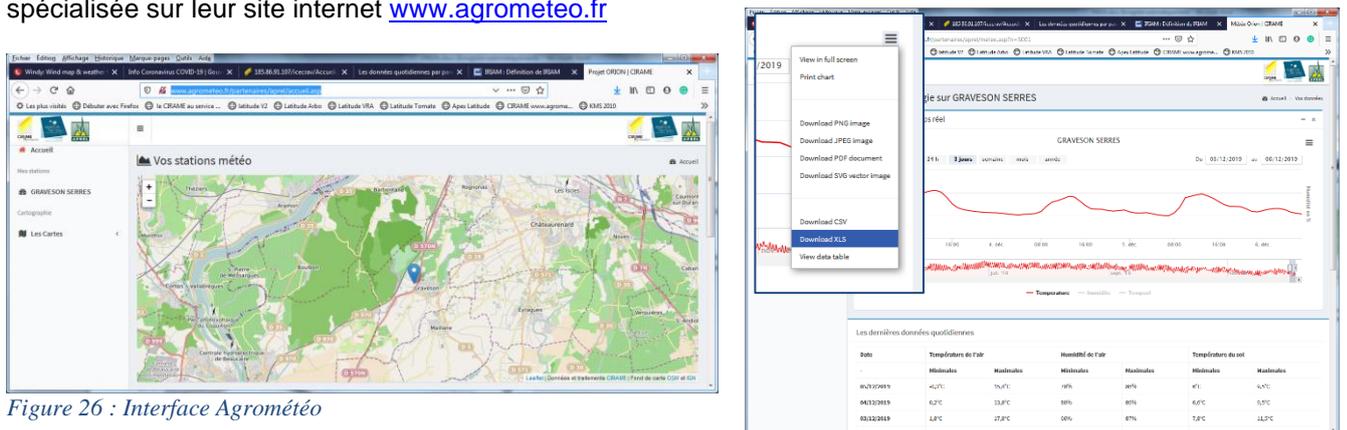


Figure 26 : Interface Agrométéo

A partir de cette rubrique il est possible de consulter en temps réel les 3 paramètres mesurés par la station, de télécharger les données horaires. Cette rubrique est accessible à l'ensemble des partenaires du projet.

- Les livrables

Ces deux années de collecte de données ont alimenté une série climatique au pas horaire et quotidien. Toutes ces données sont à disposition de l'ensemble des partenaires du projet sur demande

La rubrique internet de visualisation en temps réel des données collectées consultable à l'adresse <http://www.agrometeo.fr/partenaires/aprel/accueil.asp>

3.3.4 Synthèse en fin de culture

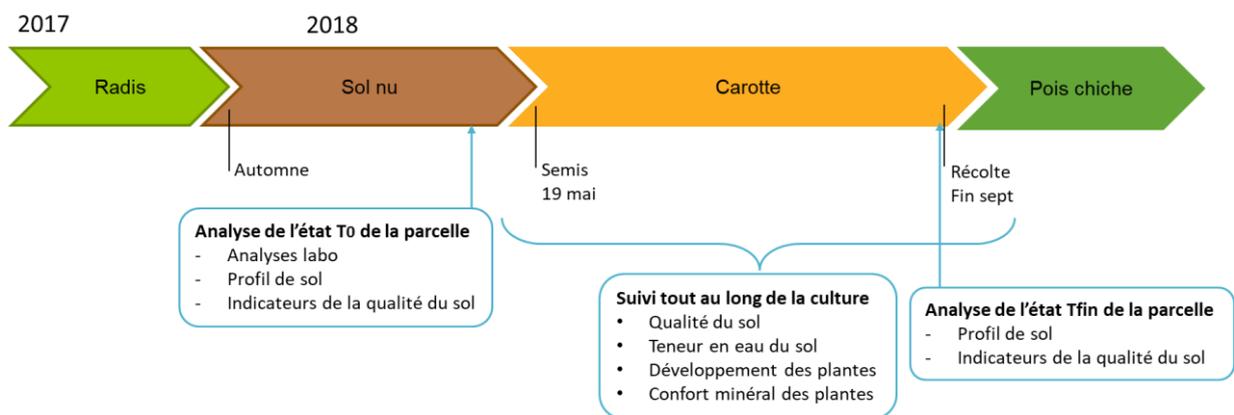
Lors de cette année de suivi nous avons pu montrer que la principale problématique de ce sol était sa structure dépendante de sa texture riche en éléments fins et en limons. C'est un sol sur lequel le travail mécanique est délicat et doit être le plus léger possible pour qu'il ne prenne pas en masse. La tenue des agrégats de ce sol est moyenne ainsi que son activité biologique. Des apports de matière organique réguliers permettraient d'améliorer la structure et de maintenir une bonne activité biologique. Un travail de sol simplifié optimisera l'efficacité et la durabilité des apports.

4. Site B : Culture en plein champ

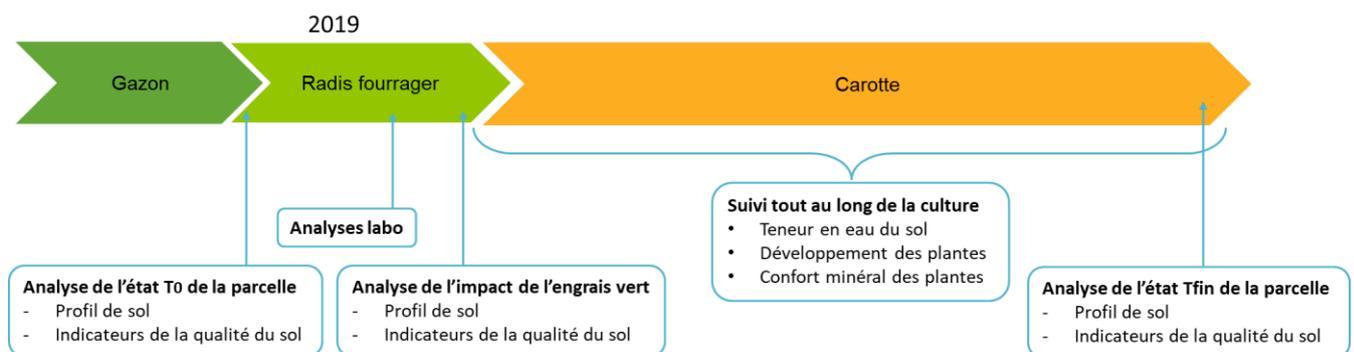
4.1 Contexte

Le site de culture de plein champ se trouve à Cadenet (Vaucluse) chez un producteur qui réalise principalement des cultures de carotte et de gazon. De la même façon que pour le site sous abris, le producteur effectuant des rotations chaque année, deux parcelles ont été suivies afin d'avoir comme culture principale une culture de carotte en été. Ce site a été suivi en partenariat avec le Ceta St Anne.

Parcelle B1 2018 :



Parcelle B2 2019 :



4.2 Campagne 2018 – suivi parcelle B1

4.2.1 Analyse T0 de la parcelle

Le diagnostic T0 de la parcelle a été réalisé bien avant l'installation des carottes, le 7 février 2018. A cette période le sol est resté nu depuis l'automne 2017.

Le sol ayant été labouré juste avant le diagnostic initial il n'a pas été possible de réaliser la série de tests terrain. Le diagnostic se base donc sur les analyses de laboratoire.

- Interprétation des analyses laboratoire

Texture	
Type de sol	Texture calcaro-limoneuse
Argile	22 %
Limons fins	29 %
Limons grossier	19 %
Sables fins	27 %
Sables grossiers	3 %
Statut Acido Basique	
pH eau	8,5
PH KCL	7,9
Calcaire total	349,1 g/kg
(Ca+Mg)/CEC	476 %
Etat organique et biologique	
Matière organique	16,88 g/kg
Carbone organique	9,76 g/kg
Azote total	1,10 g/kg
C/N	8,9
Activité biologique	2/5

ÉQUILIBRE DES CATIONS DANS LA CEC

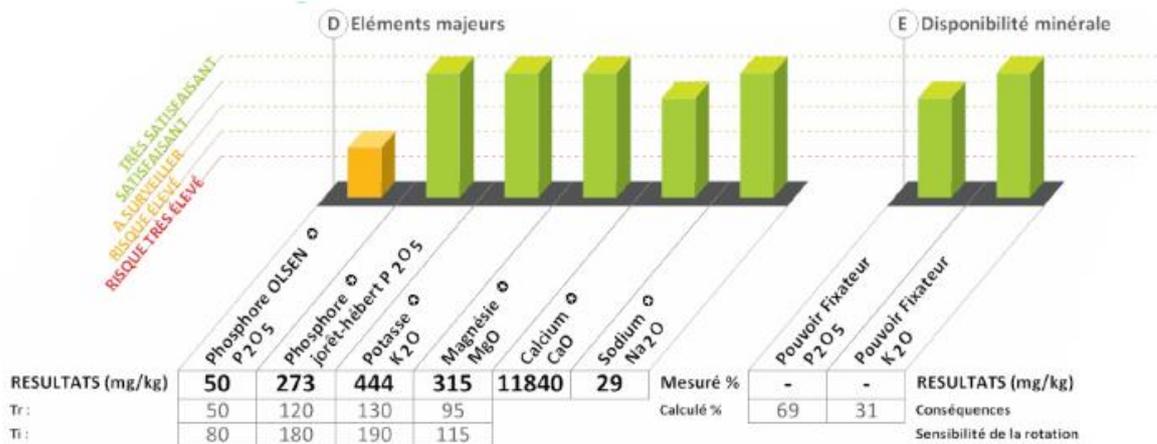
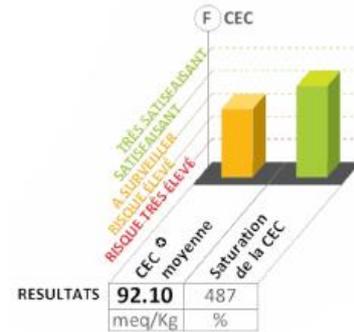
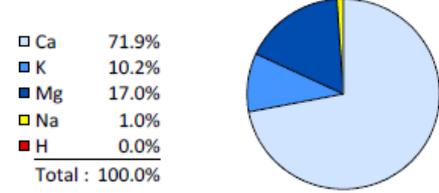


Figure 27: Résultats principaux de l'analyse laboratoire GALYS

- Fractionnement de la matière organique (analyse réalisée par VG'Ter)

	Niveau souhaitable	Valeur
Matière organique totale (MOT%)		1,96 %
Carbone organique totale %		1,14 %
Carbone organique totale (g/Kg MS)		11,4
Carbone organique labile (g/Kg MS)		0,22
% Matière organique labile (% MOT)	2,6-7,6 %	1,93 %

- Caractéristiques physiques

Le sol de la parcelle correspond à une terrasse alluvionnaire (Durance) de texture calcaro-limoneuse. Il s'agit d'un sol profond (4 m) et la nappe alluviale est à 6 m. Il se caractérise par une prédominance d'éléments fins (70% d'argiles et de limons) et très peu de cailloux. Les limons dominent (plus de 50% de limons dont 30% de limons fins), ce qui provoque une tendance à la prise en masse et un risque de battance (même si l'indice de battance 1.31 n'est pas trop élevé). Le travail du sol devrait donc se faire préférentiellement juste avant le semis pour éviter la formation de blocs compacts.

- Caractéristiques chimiques

Le pH est élevé (**8,5**). Tous les éléments ne sont pas assimilables à ce pH. Pour un sol limoneux, le pH idéal serait 7,5. Pour baisser le pH de ce sol, une solution est de relancer l'activité microbienne, pour favoriser la fermentation et créer des acides organiques.

La CEC est assez faible (**9.2 meq/100g de sol**) donc ce sol ne retient pas beaucoup les éléments. De plus le socle étant calcaire, le calcium occupe une part importante de la CEC (71.9%)..Bien que le calcaire permette de retenir les limons, il provoque la précipitation du phosphore et des oligo-éléments. Aucun ion H⁺, n'est présent dans la CEC, par conséquent les ions K⁺ fixés sur la CEC sont peu échangeables et donc moins disponibles dans la solution du sol pour les plantes.

On note de faibles teneurs en P₂O₅, peu préjudiciables pour la culture de carotte.

- Caractéristiques biologiques

Le rapport C/N de 8,2 révèle une consommation rapide des matières organiques. La teneur en MO est assez faible (1.69 %) et le pourcentage de matière organique labile (1,9%) est inférieur au niveau souhaitable, signe d'une faible activité biologique dans ce sol. Ce sol est assez peu actif et risque de s'épuiser rapidement.

L'activité biologique va être dépendante de plusieurs facteurs : l'oxygénation, la présence de MO facilement dégradable et une température et une humidité suffisante.

- Conclusion : détermination de la fumure

La première série d'analyses réalisée, a permis de mettre en évidence un sol ayant une activité biologique assez faible. La prédominance des limons fins favorise la prise en masse et la formation de croûte de battance en surface. De plus la tendance basique de ce sol réduit la disponibilité des éléments minéraux et pourrait à terme pénaliser les cultures.

En termes de fertilisation, les objectifs et besoins évoqués étaient les suivants :

Besoins
Soufre = catalyseur d'activité bactérienne
Fer = favorise la liaison des limons
MO d'origine animale : relancer l'activité microbienne et apports d'éléments nutritifs
Apport de MO de masse pour reconstituer le stock d'humus, l'objectif étant d'arriver à 2% de MO totale

Les apports de fertilisation ont été réalisés par une fumure de fond au Bochevo (2T/ha) puis par 2 engrais minéraux : 18-46 (S22, 100 kg/ha) et 13-0-46 (S25, 100kg/ha et S29, 150kg/ha).

Tableau 5: Unités de N, P, K apportés sur la culture de carotte

Engrais	Type d'apport	Dose	équilibre	Unités		
				N	P	K
Bochevo	Engrais organique	2T/ha		60	30	56
18-46	Engrais minéral	100Kg/ha	18-46	18	46	0
13-0-46		100+150kg/ha	13-0-46	33	0	115
Total				111	76	171

4.2.2 Suivi de la culture

Les carottes ont été semées le 19 mai 2018. Le début de culture s'est plutôt bien déroulé avec une bonne levée des semences. Par la suite dès le stade crayon des hétérogénéités de la parcelle sont observées avec des zones où le feuillage est vert clair et d'autres plus foncé. Ces zones pourraient être apparentées à des carences. On note aussi des zones marquées par l'engorgement et une croûte de battance importante tout au long de la culture.

La gestion de l'irrigation a été particulièrement compliquée du fait de très grosses pluies à l'automne. Dès la mi-août on note la présence de *Rhizoctonia* dans la parcelle qui impacte fortement la culture et le rendement. Le rendement final de la culture est décevant (10T/ha).

• Fertilisation et teneurs en azote

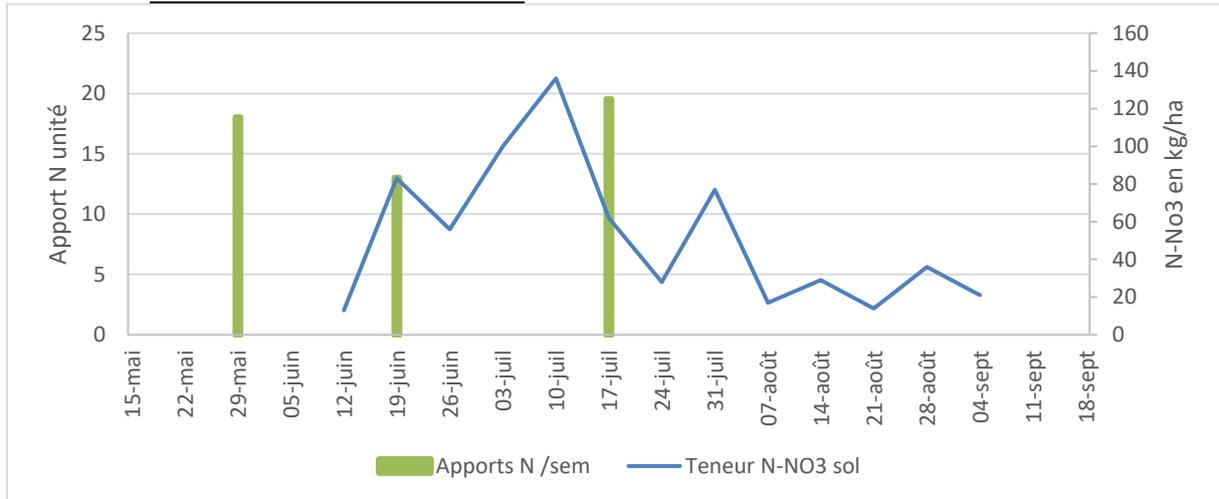


Figure 28: Apports d'N et teneur en N-NO3 du sol

Pour un rendement moyen de 40T/ha la carotte va exporter 110 unités d'azote. Ce qui correspond aux apports réalisés par la fumure et la fertilisation. Les besoins de la culture deviennent élevés à partir du stade crayon. Trois apports de fertilisation ont été réalisés le 29 mai, le 19 juin et le 17 juillet. Les mesures du taux de N-NO3 ont débuté un peu tardivement le 12 juin. A cette date on peut voir que la teneur en azote du sol est assez faible (13 kg/ha). La culture n'a pas été surirriguée sur cette période mais une forte pluie début juin a apporté 40mm d'eau ce qui a pu lessiver une partie de la fumure de fond. Après chaque apport, on observe une augmentation de la teneur en azote du sol et la culture se termine avec 20kg/ha en réserve.

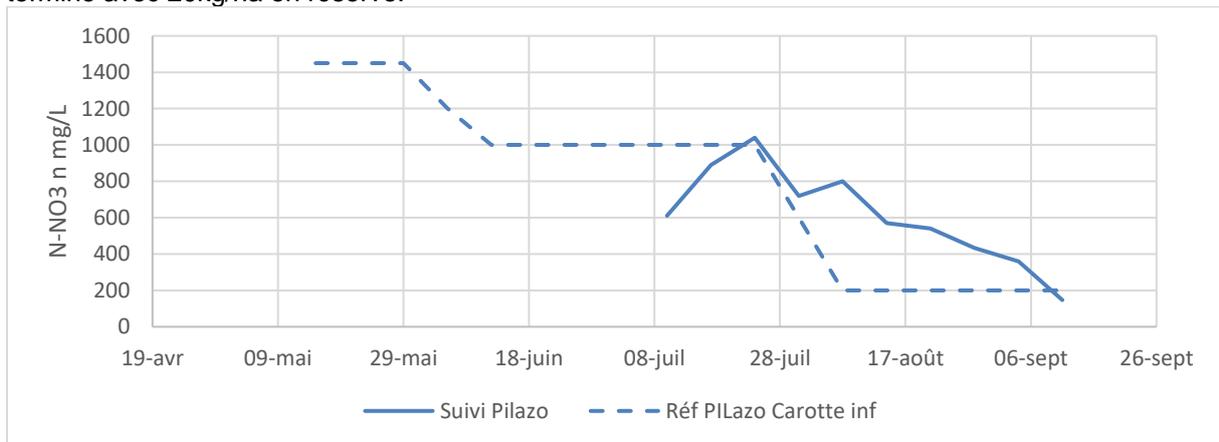


Figure 29: Teneur en azote dans la plante, méthode PILazo®

Le suivi de la teneur en azote dans la plante s'est fait dès le stade crayon, puis une fois par semaine. Malgré une teneur en azote un peu faible au début des mesures, elle se maintient par la suite au-dessus des références PILazo® du CTIFL.

• Conduite de l'irrigation

La conduite de l'irrigation a été particulièrement délicate notamment à cause de fortes pluies en fin d'été. On observe des variations importantes tout au long de la saison. Les résultats détaillés se trouvent dans le rapport Orion – Ardepi.

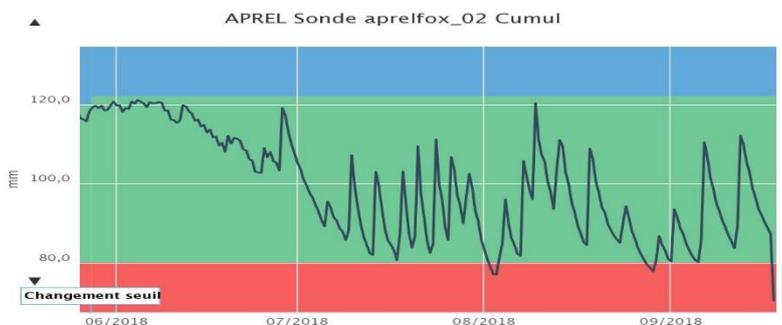


Figure 30 : Courbe cumulée de la teneur en eau du sol, interface Aqualis

• Indicateurs terrain

Une série d'indicateurs ont été mis en place pendant la culture de carotte : test de la respiration, Slack test, infiltration, teneur en eau et densité apparente.

○ Tests de respiration

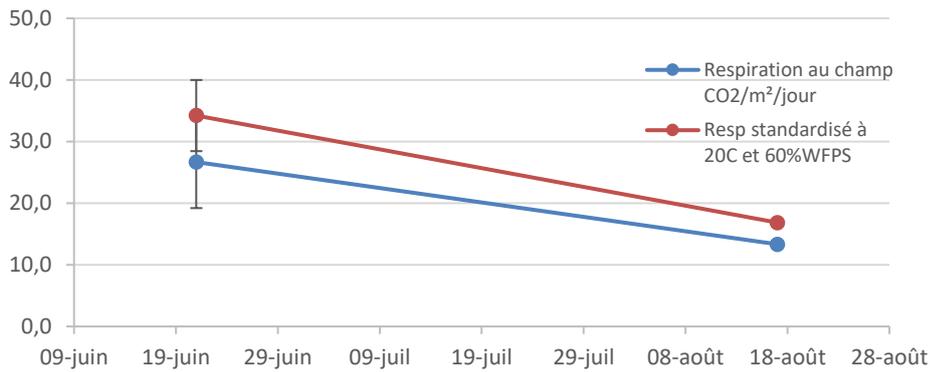


Figure 31: Evolution de la mesure de respiration, parcelle Cadenet

La respiration microbienne n'a pu être réalisée que sur 2 dates, la parcelle étant trop humide avant le mois de juin. Le 19 juin la respiration est plutôt bonne avec un dégagement moyen de CO₂ au champ de 27gCO₂/m²/jour. Le 18 août cette valeur diminue fortement et la respiration est plutôt faible avec un dégagement de 13 g de CO₂/m²/jour. L'apport de Bochevo avant le semis des carottes a pu induire une augmentation de l'activité microbienne.

○ Slack test

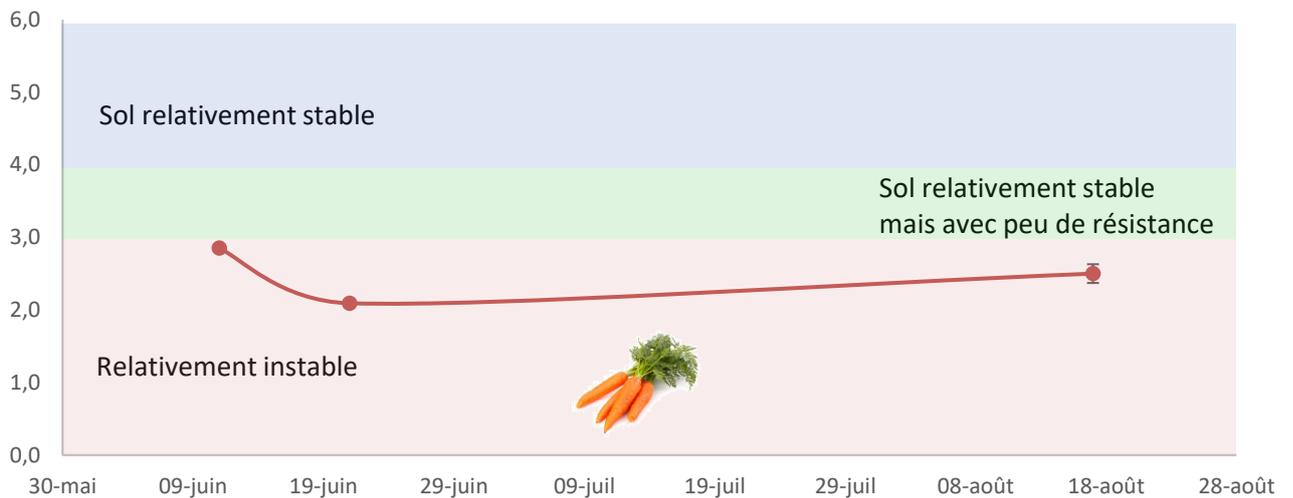
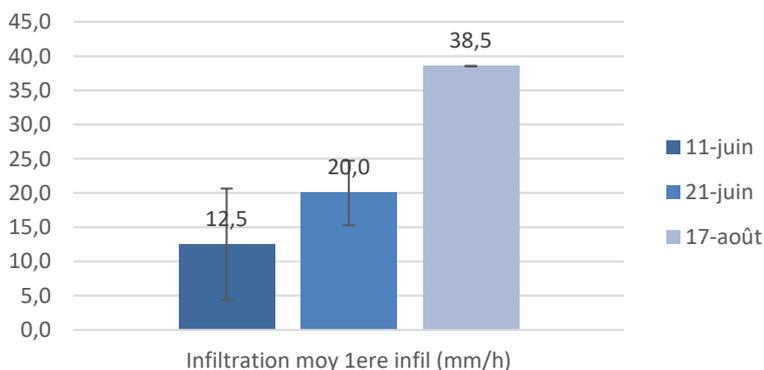


Figure 32 : Résultats issus du Slack Test, parcelle Cadenet

Le Slack test montre un sol relativement instable, très peu résistant aux forts événements climatiques. La très faible variation des données montre une certaine homogénéité de la parcelle pour cette mesure.

○ Taux d'infiltration, teneur en eau et densité apparente



	Teneur en eau (g/g)	Densité (g/cm ³)
11-juin	0,21	1,19
21-juin	0,18	1,00
17-août	0,16	1,16

Figure 33 : Evolution du taux d'infiltration, de la teneur en eau et de la densité

Une des particularités de ce sol est sa faible capacité d'infiltration de l'eau. A chaque date il a été impossible de réaliser une deuxième infiltration. Le sol se gorge rapidement d'eau et se ferme en augmentant ainsi les risques d'inondation en cas de fortes pluies.

Ces données sont fortement dépendantes des conditions météorologiques au moment de l'échantillonnage.

4.2.3 Synthèse fin de culture

Un test bêche a été réalisé à la fin de la culture de carotte à l'automne 2018, selon la méthode de Görbing.

L'observation de la surface de la parcelle a révélé une très faible présence de macroporosités et une croûte de battance très importante de 1cm d'épaisseur.

Le prélèvement d'une lame de sol à la bêche a permis d'identifier deux horizons distincts :

- 0-12 cm : couche arable de travail du sol. Les agrégats sont effrités, poreux, de taille < à 0.5mm et se désagrègent facilement sous de faibles pressions.
- 12-30 cm : horizon plus compact, les agrégats sont plus gros, d'environ 2-3cm.

Le changement d'horizon est assez net avec une rupture de densité assez abrupte.

On note quelques galeries et macroporosités mais elles restent peu nombreuses. L'activité de la macrofaune et microfaune est assez faible malgré la présence de quelques vers de terre. L'observation de la morphologie racinaire montre des racines légèrement déformées, plus fines en haut qu'en bas. Le diamètre des racines n'est pas homogène et on remarque des zones d'étranglement illustrant la difficulté des racines de pénétrer dans le sol. On note également quelques coudes dus à des contournements de mottes et une très forte présence de pucerons lanigères qui ont endommagé les racines. Au niveau de la matière organique, elle semble très peu dégradée dans ce sol. Il y a une certaine odeur de renfermé mais pas de mauvaise odeur (moisi ou putride) caractéristique d'une mauvaise décomposition de la matière organique.

Ce sol est fragile de par sa nature limoneuse. La croûte de battance est importante. Les traces de rouille et de gley indiquent un mauvais drainage sous l'horizon 20cm (eau stagnante).

L'idéal serait une interculture avec un fort enracinement (50-60cm), de type radis fourrager, afin d'aérer le sol et favoriser l'activité des microorganismes.

4.3 Campagne 2019 – suivi parcelle B2

En 2019, la parcelle adjacente à la parcelle B1 a été suivie. C'est une parcelle qui présente les mêmes caractéristiques que la parcelle B1. Le producteur ayant pu mettre en place une culture de radis fourrager comme engrais vert avant l'implantation de la culture de carotte, il a été intéressant d'observer l'évolution de la qualité du sol avant et après la réalisation de l'engrais vert.

4.3.1 Analyse T0 de la parcelle

L'état T0 de la parcelle que nous avons considéré est le diagnostic réalisé sur la parcelle B1. Les deux parcelles étant adjacentes, elles ont des caractéristiques suffisamment semblables. Les principales problématiques étaient la forte présence d'hydromorphie en profondeur et un sol très tassé. L'objectif de l'engrais vert était donc d'améliorer la structure du sol et limiter les tassements.

4.3.2 Analyse de l'impact de l'engrais vert

- Test bêche

Un test bêche avant l'arrachage du radis fourrager, en avril 2019, a permis de mettre en évidence son impact positif. Malgré des difficultés de développement dû aux conditions climatiques, les racines de radis ont permis de décompacter l'horizon supérieur du sol. De plus, le maintien d'un sol couvert sur la période hivernale a amélioré l'activité biologique et la bioturbation sur cet horizon (environ 20cm). Les mottes sont grumeleuses, on observe de nombreux trous et galeries creusés par la macrofaune. En profondeur on note une semelle de travail de sol marquée, et du tassement. Il y a encore peu d'échanges entre les horizons.



Figure 34: Profil de sol en fin d'engrais vert

- Indicateurs terrain

Tableau 6 : Résultats indicateurs de qualité du sol à Cadenet, parcelle B2

	Respiration au champ CO ₂ /m ² /jour	Respiration standardisée à 20C et 60%WFPS	Infiltration moy 1ere infil (mm/h)	Densité apparente (g/cm ³)	WFPS (%)	EC (dS/m)	Teneur en eau (g/g)	Teneur en NO ₃ -N (g/kg)	Slack test	Vers de terre (Vers/m ²)	Température sol (Celsius)
10/04	51	35	0	1.2	35	0,22	0,16	8	5,6	100	15°C
Interprétation	élevée			aérée				faible	Bonne tenue	moyen	

Sur les 20 premiers centimètres du sol, les indicateurs de qualité du sol ont révélé une infiltration de l'eau assez lente, une bonne tenue des mottes au slack test, et notamment en surface, et une densité plutôt faible. En dessous le sol est plus compact et se tient beaucoup moins au slack test.

- Conclusion : conseil de fumure

Cette série d'analyse a permis de mettre en évidence une très bonne structure de la partie supérieure du sol grâce à la mise en place de l'engrais vert. Il y a cependant encore peu d'échanges entre les horizons et un tassement important en profondeur ainsi que des traces d'hydromorphie. Pour maintenir la structure du sol il sera nécessaire de diminuer le travail du sol et d'adapter fortement la conduite de l'irrigation. En termes de fertilisation les besoins seraient les suivants :

Besoins

MO d'origine animale : maintenir l'activité biologique de surface et favoriser l'échange entre les horizons.

Apport de **MO de masse** pour reconstituer le stock d'humus, l'objectif étant d'arriver à 2% de MO totale

La majeure partie de la fertilisation a été apportée via la fumure de fond en semaine 23 avec un total de 60U d'N, 111U de P et 164U de K

Tableau 7: Unités N, P, K apportées avant la culture de carottes

	Engrais	Type d'apport	Dose	équilibre	Unités		
					N	P	K
Fumure de fond	Bochevo	Engrais organique	2T/ha	3-12,5-12,8	60	30	56
			0,45T/ha	0-18-24	0	81	108
Fertilisation en culture		Engrais minéral	150k g/ha	18-46	27	69	
Total fumure de fond					60	111	164
Total culture					87	180	164

Deux autres apports ont été réalisés en cours de culture : 150 kg/ha de 18-46 au stade crayon.

Ainsi la culture a eu un apport global de : 87U d'N, 180U de P et 164 U de K.

4.3.3 Suivi de la culture

La carottes ont été semées en semaine 24. La culture s'est bien déroulée avec une très bonne maîtrise de l'irrigation à l'aide des sondes capacitatives. Des difficultés météorologiques, notamment de très fortes pluies, ont retardé la récolte jusqu'à ce qu'elle ne soit plus possible et que la totalité des carottes aient pourries dans la parcelle. La parcelle se gorgeant rapidement d'eau et ressuyant très lentement, le passage d'outils a été impossible pour permettre la récolte.

- Fertilisation
 - Suivi des teneurs en N et K dans le sol

Les premières mesures d'éléments minéraux dans le sol ont été effectuées dès le semis des carottes 1 semaine après l'apport de matière organique. En début de culture le sol est peu riche en azote : 13kg/ha. Cette teneur augmente progressivement jusqu'à mi-juillet pour atteindre 60 kg/ha. Un deuxième apport est réalisé au stade crayon et on observe une forte augmentation dans la teneur en azote du sol jusqu'à atteindre un peu moins de 120kg/ha. L'azote diminue par la suite fortement pour se maintenir autour de 20Kg/ha jusqu'à la fin de la culture.

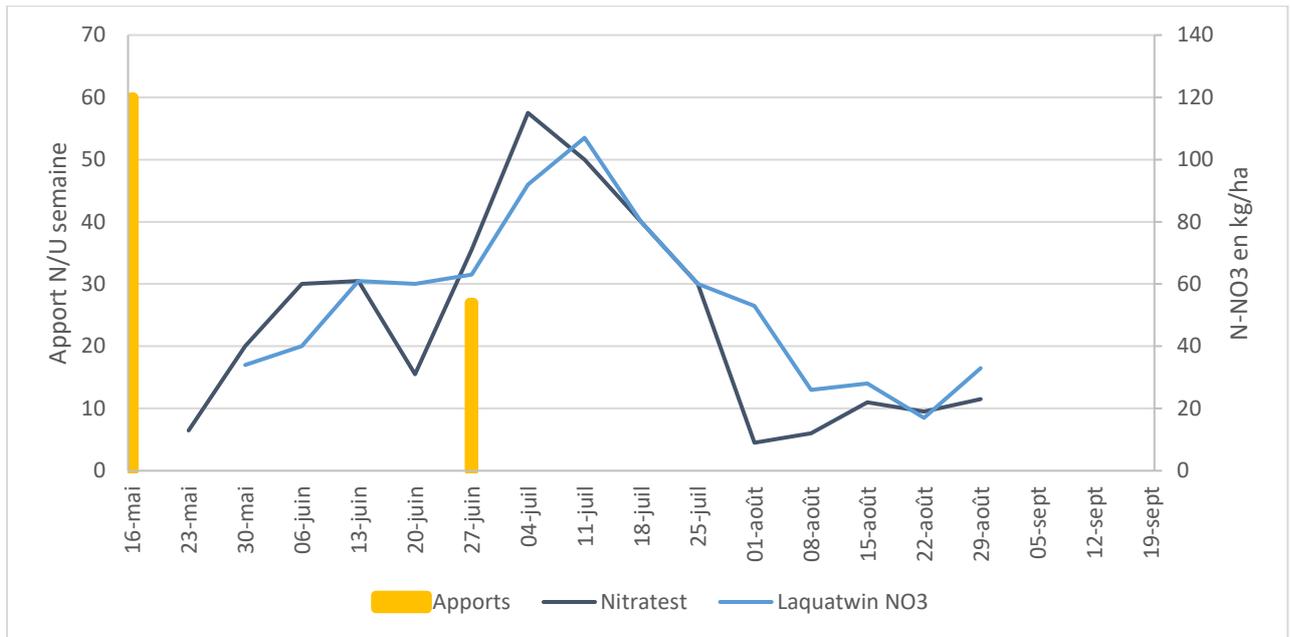
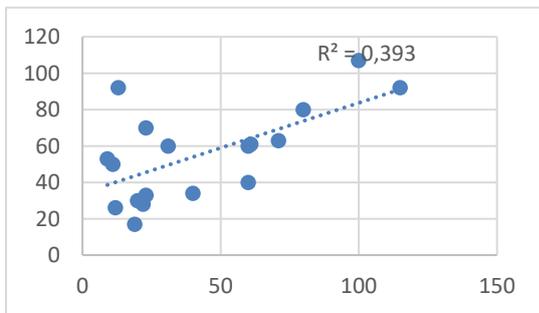


Figure 35: Suivi de la teneur en azote du sol, méthode Nitratest et Laquatwin



Sur la figure 35 la comparaison du Nitratest et de Laquatwin montre une tendance similaire. Cependant, pour cette série d'analyse, le coefficient de corrélation entre les deux outils est assez faible. Comme précédemment, on observe le plus de variations quand les valeurs mesurées sont basses. Ces variations pourraient être dues à des difficultés d'étalonnage des Laquatwin qui semblent usés en fin de saison.

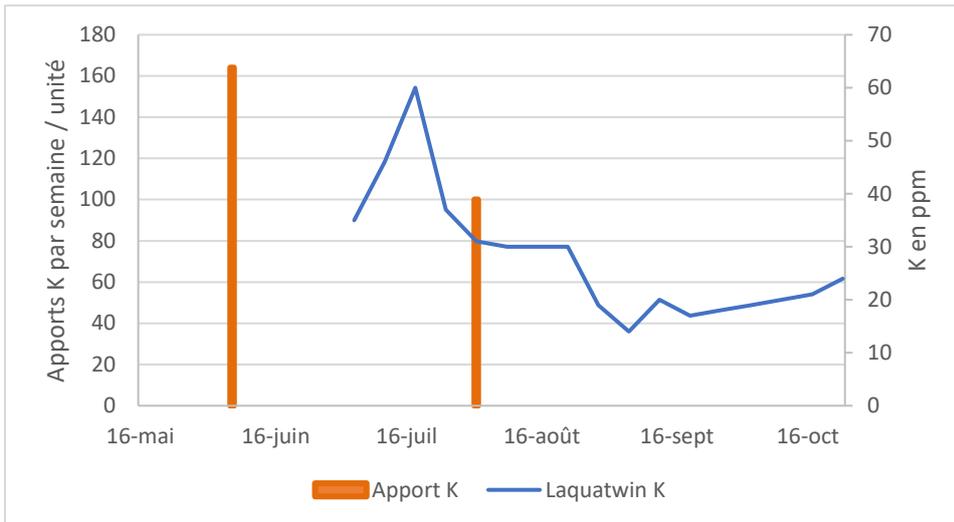


Figure 36 : Évolution de la teneur en K dans le sol et apport de potasse par semaine

Un suivi de la potasse dans le sol a été réalisé à l'aide d'un Laquatwin. Si on observe la teneur en potasse du sol on observe des valeurs élevées en début de culture, peut-être induites par la fertilisation de fond. Ces valeurs se stabilisent autour de 30ppm puis 25. Le deuxième apport de potasse n'a pas fait augmenter la teneur en potasse dans le sol. De la même façon que pour le poivron il existe peu de données quant aux besoins de la carotte en K par semaine par rapport à son stade de développement.

La potasse est un élément important de la culture de carotte : pour un rendement de 40T/ha, la carotte exporte 200 unités de potasse (CA Lot et Garonne). L'apport réalisé de 264 unités semble donc suffisant.

Ref ; La culture de la carotte Bio en Lot et Garonne, CA du lot et Garonne.

○ Suivi des teneurs en N et K dans la plante

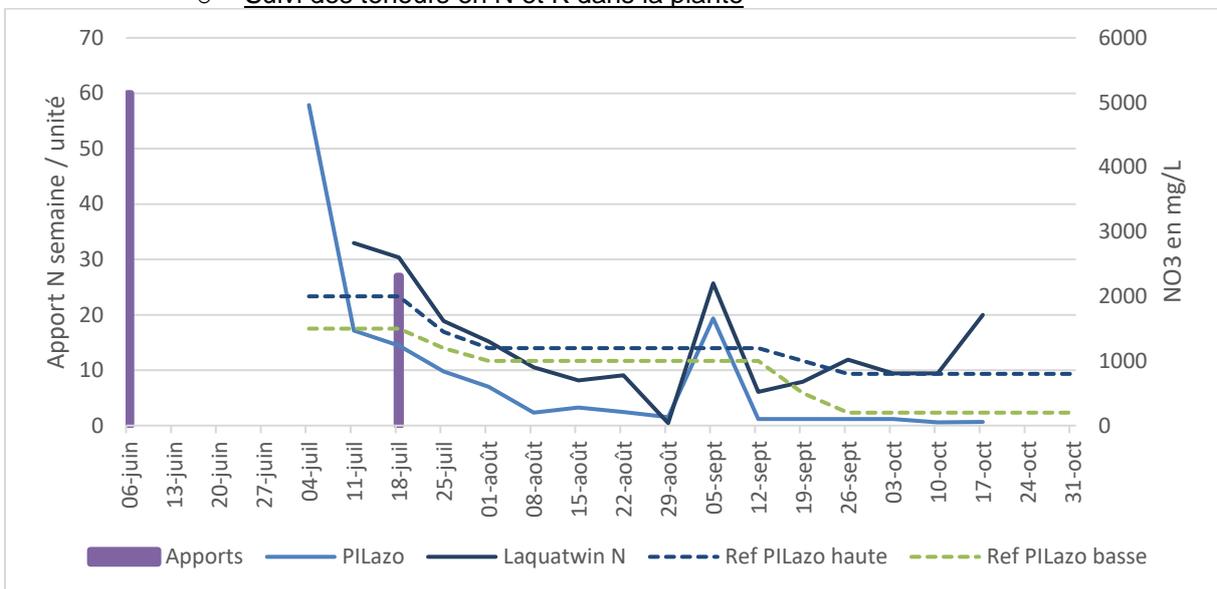
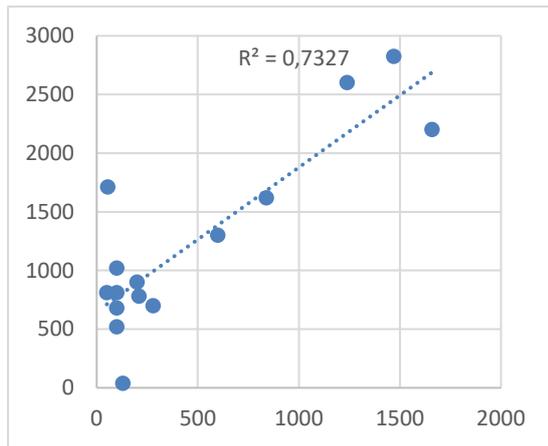
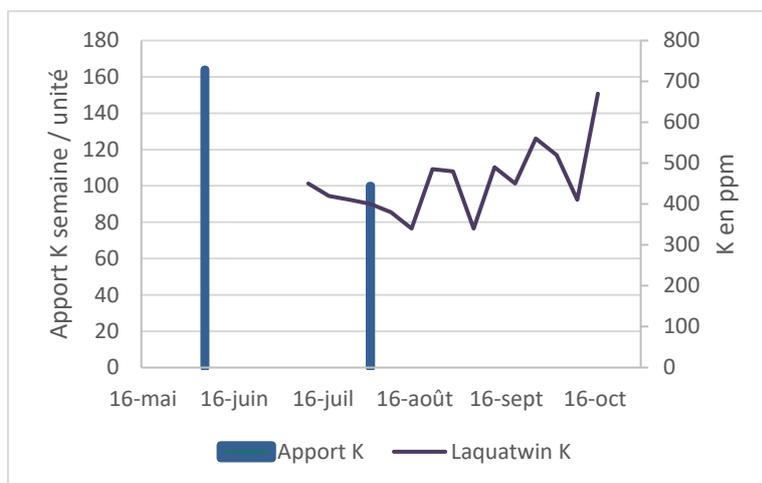


Figure 37 : Teneur en azote dans la plante méthode PILazo et Laquatwin, et apport d'azote



Les mesures d'azote dans la plante ont débuté environ 30 jours après le semis (figure 36). On note une forte teneur en azote en début de culture qui chute très rapidement, bien en dessous des seuils de carence selon la grille PILazo CTIFL. Au 5 septembre on observe un pic d'azote dans la plante qui se retrouve avec les deux appareils. Ce pic reste difficile à interpréter, le dernier apport ayant eu lieu mi-juillet donc bien en amont. La culture n'a pas marqué de grosses carences et le développement des carottes a été satisfaisant. La corrélation entre les deux outils est plutôt bonne par rapport aux mesures en poivron. On observe cependant toujours beaucoup de variabilité lorsque les valeurs mesurées sont basses.



Les valeurs de K dans la plante sont relativement stables. Elles varient entre 400 et 600ppm. Suite au deuxième apport on note une légère augmentation de la potasse deux semaines après.

Il existe peu de données quant aux valeurs seuils de potasse dans la plante, ces données restent donc difficiles à interpréter dans le cadre d'un pilotage de la fertilisation.

Figure 38: Teneurs en K dans la plante, Laquatwin

- Irrigation

Le suivi de l'irrigation était un point clé de la réussite de la culture. L'Ardepi a positionné une sonde capacitive Sentek dans la parcelle ainsi qu'un compteur d'eau connecté afin de suivre au mieux les apports et la consommation de l'eau par la culture. L'ensemble de ces résultats se trouve dans le rapport Orion de l'Ardepi.

4.3.4 Synthèse en fin de culture

Malgré un début de culture optimal, les conditions climatiques très pluvieuses ont empêché la récolte des carottes. Il nous a également été impossible de réaliser le diagnostic final de la parcelle avant mars 2020.

L'objectif du test bêche était alors d'observer l'impact de la culture de carotte suite à l'engrais vert. Le test bêche est réalisé sur les buttes pour observer le développement racinaire des carottes. Il révèle un sol meuble sur les 15 premiers centimètres (hauteur de la butte) puis une rupture franche de densité avec l'horizon suivant. On observe des traces d'activité biologique en surface mais pas assez soutenues pour qu'elle ait un impact plus en profondeur. En profondeur on note des traces de gley et d'hydromorphie. L'engorgement est toujours la problématique majeure de ce sol.

Ici l'apport de matière organique va permettre d'activer et de maintenir la vie biologique mais un travail du sol spécifique, une gestion fine de l'irrigation et une solution de drainage sont les clés pour améliorer la qualité de ce sol.

8. Conclusion

Les objectifs du projet Orion étaient d'optimiser l'utilisation de l'eau en culture maraichère via la mise en place d'outils de pilotage de l'irrigation, et d'optimiser l'utilisation de la matière organique pour améliorer la qualité du sol.

Ces deux années d'expérimentation nous ont ainsi permis de tester un panel d'outils de diagnostic de la qualité du sol de sélectionner les plus pertinents, d'affiner le protocole d'utilisation aux besoins du maraichage et d'améliorer l'interprétation des résultats.

Ainsi 5 tests complémentaires ont été choisis afin de porter un diagnostic sur la qualité du sol : le mini profil de sol et le test bêche, le test d'infiltration de l'eau, le test de densité apparente et la mesure de la teneur en eau, le test des vers de terre et le slack test. Ces tests permettent de recueillir un total de 15 indicateurs permettant de donner un diagnostic sur la structure, la stabilité structurale et l'activité biologique du sol. Deux tests complémentaires sont proposés : le test des sachets de thé et le test de respiration. Ces deux tests ont apporté des informations satisfaisantes mais soit ils sont très coûteux (test de la respiration), soit on n'a pas suffisamment de données en maraichage pour classer un sol.

Deplus, l'utilisation de sondes tensiométriques et capacitives connectées ont permis d'affiner le pilotage des irrigations et permettront un meilleur diagnostic lors de leur utilisation sur d'autres parcelles de maraichage.

Enfin le positionnement d'une station météorologique connectée sur la parcelle sous abris a été satisfaisant. Ce type d'outil pourrait permettre de piloter plus finement le climat de la serre en adaptant par exemple les aspersion à l'hygrométrie de l'air et ainsi diminuer le risque de maladies telles que les maladies cryptogamiques.

Pour améliorer le pilotage de la fertilisation, nous avons cherché à utiliser de nouveaux outils de lecture de l'azote mais aussi de la potasse dans la solution de sol et dans la plante.

La pince Dualex est une pince portative permettant de calculer un indice de confort azoté des plantes à travers la mesure de la chlorophylle, des flavonoïdes et des anthocyanes. Facile et rapide d'utilisation, le peu de références en culture maraichère rend l'interprétation des résultats délicate.

Les outils Laquatwin permettent de mesurer les ions en solution. Nous avons décidé de mesurer ici les ions K^+ et NO_3^- .

La mesure de l'azote a été comparée à des mesures obtenues par le lecteur optique Nitracheck. On observe alors une bonne corrélation entre les deux outils. Le lecteur Laquatwin reste cependant beaucoup plus rapide d'utilisation que le Nitracheck.

Pour la potasse, on observe une continuité dans les mesures tout au long de la saison. Il existe cependant moins de bornes de références pour le pilotage de la fertilisation potassique en culture maraichère ce qui rend l'interprétation des résultats délicate. On note cependant un coût d'utilisation supérieur pour les lecteurs Laquatwin dû au renouvellement de la tête de lecture au bout d'un certain nombre de mesures.

L'ensemble des résultats de ce projet a été présenté lors de 2 visites d'essais : le 29 novembre 2019 à Graveson et le 3 mars 2020 à Cadenet. Plusieurs articles ont été diffusés dans la presse agricole nationale et régionale.

A l'issue de ce projet, un recueil de fiches techniques a été réalisé et est disponible sur les sites web de l'APREL et du CRIIAM Sud (ex Ardepi). Ce recueil reprend l'ensemble des indicateurs retenus à l'issue du projet ORION et détaille les protocoles et leur interprétation. Les fiches techniques sont à destination des producteurs et des conseillers techniques.

Renseignements complémentaires auprès de :

Elodie DERIVRY, derivry@aprel.fr

Claire GOILLON, goillon@aprel.fr

APREL, Route de Mollégès D31, 13210 St Rémy de Provence – Tel 04 90 92 39 47

Action A394