

Biogreenhouse: Optimisation de la fertilisation azotée en maraîchage biologique sous serre avec des sous-produits de la méthanisation.

Rapport final



Jacques G. Fuchs, Samuel Hauenstein et Martin Koller (FiBL),

Mateo Anor, Cédric Camps, Sandrine Eberle, Yannick Fleury, et Céline Gilli (Agroscope)

2020

Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL | Ackerstrasse 113 | Postfach 219
5070 Frick | Schweiz | Tel +41 62 865 72 72 | info.suisse@fibl.org | www.fibl.org

Agroscope, Research Division, Plant Production Systems, Groupe de recherche en culture sous serre, Route des Eterpys 18, 1964 Conthey.

Résumé

En Suisse, environ 300'000 m³ de digestat liquide sont produits annuellement dans les installations de méthanisation thermophiles. Ces digestats liquides, contenant en moyenne 2,5 kg d'azote disponible par m³, 1,9 kg/m³ de P₂O₅, 4,5 kg/m³ de K₂O et 1,0 kg/m³ de Mg, pourraient représenter des engrais de recyclage intéressants, en particulier pour le maraîchage biologique, les engrais organiques du marché étant très onéreux. Alors que plusieurs références existent sur l'utilisation de ce produit en pleins champs, il existe encore très peu de connaissances sur son utilisation en cultures couvertes. Le but de ce projet était ainsi d'étudier les possibilités et limites de l'emploi de ces digestats liquides dans ce mode de production. La culture de tomates a été principalement utilisée pour cela. Voici les principaux résultats de ces travaux :

En donnant la moitié de la fertilisation azotée en fumure de fond d'une culture de tomates produisant 18 kg de fruits par m², environ 500 litres par are de digestat liquide sont nécessaires à couvrir les besoins de la plante en cet élément. Un tel apport couvre 95% des besoins de la culture en phosphore, 45% de ses besoins en potasse et 61% de ceux en magnésium.

Possibilité technique d'emploi de digestat liquide en serre de production

Le premier défi à relever est d'ordre technique. Les matières organiques en suspension dans le digestat liquide peuvent être limitant pour la fertigation à cause des risques de colmatage des goutteurs. Alors que les systèmes de goutteurs T-Tape ne sont pas appropriés pour l'emploi de digestat liquide, les goutteurs de types UniRam et NetaFim ont pu être, après une pré-filtration du digestat à 0,1 mm, être utilisés de manière satisfaisante. Pour diminuer les travaux de maintenance au niveau de la fertigation avec le digestat liquide, un système de filtre autonettoyant pourrait être conseillé; un tel système doit toutefois encore être testé dans les conditions de la pratique.

Effet sur la croissance des plantes et sur leur production

Les essais en pleine terre dans des serres expérimentales ont montré que des productions de tomates, de mâches ou de salades au moins aussi bonnes que celles obtenues avec les engrais organiques du commerce. Ceci aussi bien en au niveau quantitatif que qualitatif.

Evaluation des risques environnementaux suite à l'utilisation des digestats liquides

Le lessivage d'éléments fertilisants, en particulier de l'azote, est négligeable. Dans trois des quatre terres testées, moins de 0,5% de la quantité d'azote fertilisé a été retrouvé dans l'eau de drainage, indépendamment de la stratégie de fractionnement des apports du digestat. Dans la quatrième terre, environ 1% de l'azote fertilisé a été retrouvé dans l'eau de drainage ; cette quantité était moins importante que celle retrouvée dans le témoin avec engrais du commerce (2% de lessivage).

En ce qui concerne les risques de volatilisation d'ammoniac suite à la fertilisation des plantes, ceux-ci augmentent clairement plus les quantités données par apport augmentent, pouvant atteindre 35% de l'azote apporté. Un fractionnement des apports (par exemple avec fertilisation hebdomadaire) permet de limiter fortement ces pertes.

En ce qui concerne la physique des sols, le digestat liquide n'a influencé négativement ni la rétention en eau des terres ni la stabilité des agrégats du sol, pour autant qu'une sur-fertilisation momentanée soit évitée, donc en fractionnant les apports de digestat liquide.

L'activité biologique des sols n'a pas été influencée par le digestat liquide. Au niveau de la réceptivité des sols aux maladies telluriques, le digestat liquide semble diminuer le développement de la maladie causée par *Pythium ultimum*, mais de légèrement augmenter celle causée par *Rhizoctonia solani*. Toutefois, des essais supplémentaires à ce sujet seraient, au vu de la forte variabilité des résultats, nécessaires.

Aspects économiques

Concernant les cultures de salades, l'utilisation du digestat comme engrais liquide a permis une économie de l'ordre de 80% comparée à l'utilisation de l'engrais biologique de référence, soit entre 1'000.- et 1'500 CHF/ha. Pour les tomates, la réduction des coûts due à l'utilisation du digestat avoisine les 88%, ce qui représente entre 4000.- et 5'200 CHF/ha.

Recommandations pour la pratique

Le digestat liquide représente un engrais très intéressant pour le maraîchage, en particulier, vu le prix élevé des engrais organiques du commerce, pour le maraîchage bio. Toutefois, certains points doivent être respectés pour que son utilisation soit couronnée de succès.

- respecter, pour les producteurs bio, la distance de transport maximum autorisée pour le digestat liquide (20 km à vol d'oiseau).
- faire est un bilan de fumure clair pour définir les quantités de digestat liquide utilisée. Ceci en tenant compte des analyses du digestat liquide en question, les valeurs fertilisantes pouvant fortement varier entre deux installations.
- définir est une technique d'épandage du digestat liquide adapté à son système de production: soit par tuyaux semi-manuellement, soit par fertigation.
- fractionner les apports de digestat liquide. Avec un système de fertigation, un apport hebdomadaire est à conseiller. Lors d'apport manuel, un apport tous les quinze jours pourraient être optimal.
- pour les cultures consommées crues (comme la salade), il faut, pour des raisons hygiéniques, n'utiliser que du digestat liquide provenant de systèmes thermophiles, les digestats provenant d'installations mésophiles n'étant pas appropriés pour ces cultures (Fuchs et al., 2014¹).

Conclusions

L'emploi de digestat liquide en maraîchage bio est donc possible et représente même une pratique sensée du point de vue aussi bien économique qu'environnemental. Employé de manière correcte, le digestat liquide n'a montré aucun effet négatif sur la fertilité du sol, la santé des plantes et l'environnement. Du point de vue hygiénique, le digestat liquide produit de manière thermophile ne représente pas de risques, pour autant que la gestion de l'installation de méthanisation soit gérée selon les règles (éviter toute possibilité de court-circuit entre les matières entrant sur l'installation et les produits en sortant).

Ainsi, suite à ce projet, nous pouvons recommander l'emploi de ce produit en maraîchage. Ceci est vrai aussi bien pour le maraîchage bio que pour le maraîchage conventionnel. Pour ce dernier, il faut toutefois noter que l'avantage financier est moindre, les coûts pour les engrais minéraux étant nettement inférieurs aux engrais bio.

¹ Fuchs, J.G., Baier, U., Berner, A., Philipp, W., Schleiss, K., 2014. Abschätzung des hygienischen Risikos im Zusammenhang mit der Anwendung von flüssigem Gärgut in der Schweiz. Schlussbericht des Forschungsprojektes im Auftrag vom BFE, BLW, BAFU und BVET, 23 pp.

Biogreenhouse: Optimierung der Stickstoffdüngung im biologischen Gemüsebau in Gewächshäusern mit Nebenprodukten der Vergärung.

Zusammenfassung

In der Schweiz werden jährlich rund 300'000 m³ flüssiges Gärgut in thermophilen Biogasanlagen produziert. Dieses flüssige Gärgut, das im Durchschnitt 2,5 kg/m³ verfügbaren Stickstoff, 1,9 kg/m³ P₂O₅, 4,5 kg/m³ K₂O und 1,0 kg/m³ Mg enthält, könnte insbesondere für den organischen Gemüseanbau ein interessanter Recyclingdünger sein, da organische Dünger auf dem Markt sehr teuer sind. Zwar gibt es mehrere Berichte über die Verwendung dieses Produkts im Freiland, aber es gibt noch sehr wenig Wissen über seine Verwendung in gedeckten Kulturen. Ziel dieses Projekts war es daher, die Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung von flüssigem Gärgut in dieser Produktionsweise zu untersuchen. In der vorliegenden Studie wurde der Tomatenanbau schwerpunktmässig untersucht. Hier sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit:

Wird bei einer Tomatenkultur, welche 18 kg Früchte pro m² produziert, die Hälfte der benötigten Stickstoffmenge als Grunddüngung appliziert, werden noch etwa 500 Liter flüssiges Gärgut pro Arebenötigt, um den Bedarf der Pflanze an diesem Element zu decken. Damit werden 95% des Phosphor-, 45% des Kali- und 61% des Magnesiumbedarfs der Pflanze gedeckt.

Technische Möglichkeit der Verwendung vom flüssigen Gärgut in Produktionsgewächshäusern

Die grösste Herausforderung ist technischer Natur: Im flüssigen Gärgut suspendiertes organisches Material kann wegen der Gefahr verstopfter Tropfer limitierend sein. Während T-Tape-Tropfersysteme für die Verwendung von flüssigem Gärgut nicht geeignet sind, konnten die UniRam- und NetaFim-Tropfer nach einer Vorfiltration des Gärgutes auf 0,1 mm zufriedenstellend eingesetzt werden. Um den Wartungsaufwand bei Düngung mit flüssigem Gärgut zu reduzieren, könnte ein selbstreinigendes Filtersystem verwendet werden; ein solches System muss jedoch noch unter Praxis-Bedingungen getestet werden.

Wirkung auf Pflanzenwachstum und -produktion

Feldversuche in Versuchsgewächshäusern haben gezeigt, dass die Tomaten-, Feldsalat- oder Salatproduktion mindestens so gut ist wie mit handelsüblichen organischen Düngern. Dies gilt sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht.

Bewertung der Umweltrisiken nach der Verwendung von flüssigem Gärgut

Die Auswaschung von Nährstoffen, insbesondere von Stickstoff, ist vernachlässigbar. In drei der vier getesteten Böden wurden weniger als 0,5% des gedüngten Stickstoffs im Drainagewasser gefunden, unabhängig davon, ob die gesamte Gärgut-Menge in einer oder mehreren zeitlich versetzten Gaben verabreicht wurde. Im vierten Boden wurde etwa 1% des gedüngten N im Drainagewasser gefunden; diese Menge war geringer als die, die in der Kontrolle mit handelsüblichem Dünger gefunden wurde (2% Auswaschung).

Was das Risiko der Ammoniakverflüchtigung nach der Pflanzendüngung betrifft, so nimmt dies deutlich zu, wenn die pro Anwendung verabreichten Mengen zunehmen, und es kann sich bis zu 35% des eingesetzten Stickstoffs verflüchtigen. Eine Aufteilung des Inputs auf

mehrere Gaben (z.B. bei wöchentlicher Düngung) ermöglicht es, diese Verluste stark zu begrenzen.

Bezüglich Bodenphysik hatte flüssiges Gärgut keinen negativen Einfluss auf die Wasserrückhaltefähigkeit des Bodens oder die Stabilität der Bodenaggregate, vorausgesetzt, dass eine vorübergehende Überdüngung vermieden wird, was durch Aufteilung des Gärgut Inputs auf mehrere Gaben erreicht wird.

Die biologische Aktivität des Bodens wurde durch das flüssige Gärgut nicht beeinflusst. Was die Anfälligkeit des Bodens für bodenbürtige Krankheiten betrifft, so scheint der flüssige Gärgut die Entwicklung von Krankheiten, die durch *Pythium ultimum* verursacht werden, zu verringern, die durch *Rhizoctonia solani* verursachte Krankheit jedoch leicht zu erhöhen. Angesichts der hohen Variabilität der Ergebnisse wären jedoch weitere Studien zu diesem Thema erforderlich.

Wirtschaftliche Aspekte

Beim Salatanbau führte der Einsatz von Gärgut als Flüssigdünger zu Einsparungen von rund 80% gegenüber dem Einsatz des organischen Referenzdüngers, d.h. zwischen 1'000 und 1'500 CHF/ha. Bei Tomaten betrug die Kostensenkung durch die Verwendung von Gärgut rund 88%, was zwischen 4'000 und 5'200 CHF/ha entspricht.

Empfehlungen für die Praxis

Flüssiges Gärgut ist ein sehr interessantes Düngemittel für den Gemüseanbau, vor allem angesichts des hohen Preises von organischen Handelsdüngern für den ökologischen Gemüseanbau. Bestimmte Punkte müssen jedoch respektiert werden, damit sein Einsatz erfolgreich ist.

- Die Einhaltung der maximal zulässigen Transportentfernung für das flüssige Gärgut (20 km Luftlinie) für Bio-Produzenten beachten.
- Eine klare Nährstoffbilanz ist erforderlich, um die einsetzbare Menge Gärgut zu definieren. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Analysen des jeweiligen flüssigen Gärgutes, da die Düngemittelwerte zwischen zwei Anlagen stark variieren können.
- Eine an das Produktionssystem angepasste Technik zur Ausbringung des flüssigen Gärgutes definieren: entweder durch halbmanuelle Leitungen oder durch Fertigation.
- Aufteilung des gesamten Gärgut Inputs auf mehrere Gaben. Bei einem Fertigationssystem wird eine wöchentliche Gabe empfohlen. Bei manueller Düngung könnte eine vierzehntägige Gabe optimal sein.
- Für Kulturen wie Salat (roh verzehrt) sollte, wie die Studie von Fuchs et al. (2014)² zeigt aus hygienischen Gründen nur flüssiges Gärgut aus thermophilen Systemen (z.B. aus Anlagen des Kompogas-Typs) verwendet werden, da Gärgut aus mesophilen Systemen für diese Kulturen nicht geeignet ist.

² Fuchs, J.G., Baier, U., Berner, A., Philipp, W., Schleiss, K., 2014. Abschätzung des hygienischen Risikos im Zusammenhang mit der Anwendung von flüssigem Gärgut in der Schweiz. Schlussbericht des Forschungsprojektes im Auftrag vom BFE, BLW, BAFU und BVET, 23 pp.

Schlussfolgerungen

Die Verwendung von flüssigem Gärgut im biologischen Gemüseanbau ist möglich und aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht sogar sinnvoll. Bei korrekter Anwendung hat flüssiges Gärgut keine negativen Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit, die Pflanzengesundheit und die Umwelt gezeigt. Aus hygienischer Sicht stellt thermophil erzeugtes flüssiges Gärgut kein Risiko dar, solange die Vergärungsanlage ordnungsgemäß betrieben wird (Vermeidung jeglicher Möglichkeit von Kurzschlüssen zwischen den in die Anlage gelangenden Materialien und den die Anlage verlassenden Produkten).

Daher können wir nach diesem Projekt die Verwendung dieses Produkts im Gemüseanbau empfehlen. Dies gilt sowohl für den ökologischen als auch für den konventionellen Gemüseanbau. Bei letzterem ist jedoch zu beachten, dass der finanzielle Vorteil geringer ist, da die Kosten für mineralische Düngemittel viel niedriger sind als für organische Düngemittel.

Table des matières

1. Introduction.....	1
1.1 Problématique générale	1
1.2 Fertilisation des cultures maraîchères biologiques sous serre.....	2
1.3 Buts et organisation du projet.....	3
2. Matériel et méthodes.....	4
2.1 Terres employées	4
2.2 Fertilisants employés.....	4
2.3 Optimisation de l'application des digestats liquides.....	4
2.4 Effet du digestat liquide sur les caractéristiques physiques des sols	5
<i>Capacité de rétention en eau des sols</i>	<i>5</i>
<i>Stabilité des agrégats de sol.....</i>	<i>5</i>
2.5 Effet du digestat liquide sur la réceptivité des sols aux maladies telluriques.....	5
<i>Production des inocula des champignons pathogènes.....</i>	<i>5</i>
<i>Test de réceptivité Pythium ultimum - cresson</i>	<i>8</i>
<i>Test de réceptivité Rhizoctonia solani - basilic.....</i>	<i>8</i>
2.6 Influence de la stratégie de fertilisation sur le lessivage de l'azote	8
2.7 Influence de la stratégie de fertilisation sur les pertes ammoniacales.....	8
2.8 Essai tomates en pots.....	10
<i>Conduite de la culture de tomates.....</i>	<i>10</i>
2.9 Essais tomates en bacs.....	11
<i>Tomates.....</i>	<i>11</i>
<i>Conduite de la culture de tomates.....</i>	<i>11</i>
2.10 Essai tomates en pleine terre	16
<i>Fertilisation.....</i>	<i>16</i>
<i>Tomates.....</i>	<i>16</i>
<i>Conduite des cultures de tomates.....</i>	<i>17</i>
<i>Description des modalités testées.....</i>	<i>18</i>
<i>Essai mâche suite à la culture de tomates</i>	<i>18</i>
2.11 Essai salades en pleine terre	19
<i>Fertilisation.....</i>	<i>19</i>
<i>Conduite de la culture de salades.....</i>	<i>20</i>
2.12 Analyses statistiques des résultats	21
3. Résultats.....	22
3.1 Application des digestats liquides en serre : solutions techniques.....	22
3.2 Effets de la fertilisation sur la croissance des plantes et sur leurs productions ...	24
3.3 Effet des stratégies d'apport de digestat liquide sur lessivage de l'azote.....	42
3.4 Effet des stratégies d'apport de digestat liquide sur les pertes ammoniacales....	45
3.5 Effets de la fertilisation des sols sur leurs caractéristiques physiques	47
3.6 Effets de la fertilisation des sols sur leurs caractéristiques chimiques	50
3.7 Effet de la fertilisation des sols sur leur activité biologique	56
3.8 Effet du digestat liquide sur leur réceptivité aux maladies	58
3.9 Aspects économiques de l'utilisation de digestat liquide	63

4. Discussion des résultats	65
4.1 Considération préalable.....	65
4.2 Aspects techniques	65
4.3 Effet du digestat liquide sur la croissance des plantes et sur leur production.....	66
4.4 Évaluation des risques environnementaux et sur la fertilité des sols suite à l'utilisation du digestat liquide.....	66
5. Recommandations pour la pratique.....	68
6. Conclusions	68
7. Remerciements.....	69

I. Introduction

I.1 Problématique générale

En agriculture biologique, la gestion de la fertilité du sol est basée sur des stratégies agro-écologiques nécessitant des connaissances approfondies sur la situation pédo-climatique et sur le flux de nutriments dans l'agro-système. Elle est influencée et régulée par les rotations culturales, les engrais verts, l'application de compost et d'engrais biologiques. La fertilisation azotée, en cours de culture, peut être apportée par des produits organiques liquides d'origine végétale ou animale. Ces produits sont très chers si l'on veut apporter des doses d'azote suffisantes.

D'autre part, en Suisse, environ 300'000 m³ de digestat liquide sont produits annuellement dans les installations de méthanisation thermophiles. Les digestats liquides provenant de ces installations pourraient être intéressants pour les cultures maraîchères biologiques sous serre car ils contiennent une part importante d'azote directement assimilable (environ la moitié de l'azote contenu dans les digestats liquides se trouve sous forme ammonium). Toutefois, un apport trop important de digestat liquide peut influencer négativement le sol et l'environnement en raison d'une sur-fertilisation en particulier en potasse, en phosphore et en azote minéral.

En ce qui concerne la distance de 20 km à respecter - selon le cahier des charges pour la production, la transformation et le commerce des produits du bourgeon - pour le transport des digestats liquides, les principales installations de méthanisation suisses se situent proche des zones de production en cultures maraîchères. Selon la Centrale Suisse de la culture maraîchère et des cultures spéciales (CCM), il y avait en 2015 125 exploitations en agriculture biologique possédant des serres ou des tunnels hauts pour une surface de 85 ha. La majorité de ces exploitations est située dans les cantons d'Argovie (12%), de Berne (8%), de Thurgovie (9,6%), du Tessin (7,2%), de Vaud (9,6%) et de Zurich (25,6%), donc suffisamment proche des installations de méthanisation. Cependant, relativement peu de connaissances existent actuellement sur une utilisation optimale de ce sous-produit. De ce fait, les recommandations d'utilisation de ces sous-produits sont encore très vagues et peu concrètes (voir « Directive Suisse 2010 de la branche sur la qualité du compost et du digestat », publiée par la « Commission de l'inspection de la branche suisse du compostage et de la méthanisation »). Ainsi pour éviter tout problème dans la pratique pouvant nuire à l'image du digestat liquide, cette directive n'incite pas à l'utiliser en maraîchage. En effet, les lacunes à ce sujet sont importantes en particulier dans les domaines du maraîchage sous serre. Egalement peu de travaux existent sur l'utilisation de digestats liquides en agriculture. Dans la plupart des cas, ils se limitent à assurer l'innocuité des produits ou à l'effet fertilisant à court ou moyen terme d'une utilisation simple de ces produits. D'autres travaux ont démontré la valeur fertilisante des digestats liquides (Albuquerque et al., 2012¹; Weiland, 2010²; Härle, 2009³). Certains ont cependant montré qu'un apport inadéquat de digestat peut influencer négativement le sol ou

¹ Albuquerque J.A., de la Fuente C., Campoy M., Carrasco L., Nájera I., Baixauli C., Caravaca F., Roldán A., Cegarra J., Bernal M.P., 2012 : Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties ; *European Journal of Agronomy* 43 : 119-128.

² Weiland, P. 2010 : Biogas production: current state and perspectives ; *Applied Microbiology and Biotechnology* 85 : 849-860.

³ Härle, M. 2009 : Biogasgülle - Eigenschaften, Einfluss auf den Ackerbau und Rechtliche Grundlagen ; Diplomarbeit an der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen, 74 pp.

l'environnement (Badalikova et Bartlova, 2014¹; Unterfrauner, 2009²; Moller et al., 2009³). Ainsi, il est essentiel d'obtenir plus de données spécifiques pour pouvoir optimiser l'utilisation des digestats liquides en cultures maraîchères biologiques sous serre.

Du point de vue hygiéniques, les digestats liquides produits de manière thermophile (comme ceux provenant d'installation de méthanisation de type Kompogas) ne représentent pas de risque pour la qualité des légumes produits, pour autant que la gestion de l'installation de méthanisation soit gérée selon les règles (éviter toute possibilité de court-circuit entre les matières entrant sur l'installation et les produits en sortant) (Fuchs et al., 2014⁴).

1.2 Fertilisation des cultures maraîchères biologiques sous serre

En culture maraîchère biologique sous serre, la fertilisation azotée peut être apportée par des engrais organiques liquides ou solides. Pour des cultures ayant des besoins élevés en azote, les apports avant plantation ne sont pas suffisants. Mais, en cours de culture, seuls des produits liquides peuvent être utilisés via le système de fertigation. Mais ces engrais organiques liquides sont très chers si l'on veut apporter suffisamment d'azote. Les digestats liquides provenant de la méthanisation pourraient être intéressants à utiliser car ils contiennent une part importante d'azote directement assimilable. Toutefois, peu de connaissances existent actuellement sur une utilisation optimale des digestats, particulièrement en cultures maraîchères biologiques sous serre.

¹ Badalikova, B., Bartlova, J., 2014. Effect of soil tillage and digestate application on some soil properties. *Columella - Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 1, 7-11.

² Unterfrauner, H., 2009. Minderung der schädlichen Wirkung von Biogassülle auf Böden durch gezielte Stärkung bestimmter Parameter vor der Applikation. 64. ALVA- Jahrestagung: „Landwirtschaft – Grundlage der Ernährungssicherung: regional oder global?“. Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-, Veterinär- und Agrarwesen, A-Wien, A-Salzburg.

³ Moller, J., Boldrin, A., Christensen, T.H., 2009. Anaerobic digestion and digestate use: accounting of greenhouse gases and global warming contribution. *Waste Management & Research* 27, 813-824.

⁴ Fuchs, J.G., Baier, U., Berner, A., Philipp, W., Schleiss, K., 2014. Abschätzung des hygienischen Risikos im Zusammenhang mit der Anwendung von flüssigem Gärgut in der Schweiz. Schlussbericht des Forschungsprojektes im Auftrag vom BFE, BLW, BAFU und BVET, 23 pp.

I.3 Buts et organisation du projet

L'objectif global de ce projet est de développer des stratégies pour une valorisation optimisée des digestats liquides en cultures maraîchères sous serre. Les deux axes principaux du projet sont les aspects liés à la technique d'application du digestat liquide et aux aspects agronomiques d'une telle valorisation.

Pour atteindre cet objectif, le projet a été organisé en six axes de travail :

Les six axes de travail du projet sont :

- (1) Optimisation de l'application des digestats liquides : (a) évaluer les possibilités techniques de traitement des digestats liquides pour permettre leur distribution dans les cultures. (b) évaluer les techniques d'épandage existantes quant à leur capacité à être utilisées avec des produits contenant des matières en suspension.
- (2) Optimisation de la fertilisation de la tomate avec les digestats liquides : définir les meilleures stratégies d'apport (fractionnement dans le temps, combinaison avec d'autres fertilisants).
- (3) Minimalisation des effets collatéraux sur l'environnement : évaluer les limites de différents types de sol de serre biologique en Suisse par rapport aux apports de digestats liquides. En particulier, les effets de divers apports de ces sous-produits sur les qualités physiques des sols, ainsi que sur les risques de lessivage et d'émissions gazeuses, seront étudiés.
- (4) Optimisation de l'effet des digestats liquides sur la santé des plantes : étudier les possibilités d'apports raisonnés de digestats pour diminuer l'incidence des maladies du sol, aussi en combinaison avec du compost.
- (5) Evaluation économique des stratégies de valorisation des digestats liquides.
- (6) Dissémination des résultats.

2. Matériel et méthodes

2.1 Terres employées

Quatre terres ont été utilisées pour la réalisation des essais :

- une terre argileuse moyennement humique provenant d'un sol noir de l'entreprise maraîchère « Gerber Biogreens » à Fehraltorf (ZH), appelée « terre noire »
- une terre sableuse fortement limoneuse et faiblement humique provenant d'un sol de l'entreprise maraîchère de la famille Höneisen, Tännlihof, à Andelfingen (ZH), appelée « terre maraîchère »
- une terre argilo-sableuse faiblement humique pour horticulture élaborée par l'entreprise Leureko AG (Laufenburg-AG), appelée «terre horticole 1».
- une terre sableuse fortement limoneuse et faiblement humique pour horticulture élaborée par l'entreprise Leureko AG (Laufenburg-AG), appelée «terre horticole 2».

Les caractéristiques de ces terres sont présentées dans le Tab. 1.

En plus de ces terres, le substrat Ricoter 127 (compost d'écorces, succédané de tourbe, coco-peat, terre végétale), avec un très bon effet tampon une bonne capacité de rétention d'eau, a été utilisé dans un essai en pot.

2.2 Fertilisants employés

Pour les essais réalisés en 2017, du digestat liquide provenant de l'installation de méthanisation type « Kompogas » de Pratteln (BL), exploitée par Leureko AG a été utilisé pour les essais en bacs, et de l'installation de méthanisation type « Kompogas » de Vétroz (VS), exploitée par EcoBois Recyclage SA pour les essais en pot. Le digestat liquide utilisé en 2018 provenait de l'installation de méthanisation type « Kompogas » de Wauwil (LU), exploitée par Axpo Kompogas Wauwil AG, Wauwil-LU ; ce digestat était tamisé à 0,14 mm. Les analyses de ces digestats sont présentés dans le Tab. 2. En 2019, le digestat liquide utilisé provenait de l'installation de méthanisation type « Kompogas » de Vétroz (VS).

Dans les essais, ces digestats ont été comparés avec une fertilisation réalisée avec des engrais du commerce bio : raclure de corne (14 % de N), fumier de poules (3,5 % de N, 4 % de P₂O₅ et 2 % de K₂O) et Patentkali® (30 % de K₂O et 6 % de Mg). Pour le calcul de la fertilisation azotée, 70% de l'azote total du digestat liquide a été considéré (selon Suisse Bilan).

Pour l'essai dans le substrat Ricoter 127, une modalité avec fumure minérale a été réalisée (fumure de fond : Plantomaag® : 15 % de N, 44 % de P, 6,2 % de K et 1,2 % de Mg)

2.3 Optimisation de l'application des digestats liquides

En serre, l'utilisation de digestat est compliquée par l'emploi de systèmes de fertigation sensibles au colmatage des gouttes à gouttes. Ainsi, un banc d'essai a été mis en place en 2018 afin de comparer différents types de goutte à goutte et leur aptitude à apporter du digestat. Les modalités testées (sur une parcelle) sont :

- Goutteurs autorégulants à clapet et microtube type Netafim PCJ CNL 4 l/h (1,8 - 2 bars)
- Goutteurs autorégulants intégrés type UniRam à gaine semi-rigide 2,3 l/h (1,8 - 2 bars)
- Goutteurs à gaine souple type T-Tape 1 l/h (0,5 bars)

Le digestat utilisé est celui de l'installation de type Kompogas de Vétroz. Il a été stocké au réfrigérateur à 12°C avant utilisation. Le digestat utilisé dans l'essai est filtré, dilué à 50% puis laissé à décanter une nuit avant l'apport. L'apport se fait par deux pompes réglées à 1% (deux fois 1%) avec des filtres à lamelle de 100 µm. Le temps d'irrigation a été adapté entre les modalités, ainsi le même volume de digestat passait par les goutteurs.

Les volumes de solution ont été suivis, afin de voir si et quand les goutteurs se bouchaient. Un nettoyage régulier des filtres et crépines a été dans tous les cas nécessaires. Une mesure de salinité a été effectuée avant et après le filtre à lamelles, ainsi qu'aux goutteurs, afin d'observer d'éventuelles pertes de nutriments.

Comme banc d'essai, une culture de basilic plantée le 25.06.2018 en serre pleine terre a été utilisée.

2.4 Effet du digestat liquide sur les caractéristiques physiques des sols

L'influence des fertilisants organiques sur la capacité de rétention en eau des sols ainsi que sur la stabilité des agrégats de sols a été évaluée

Capacité de rétention en eau des sols

La capacité de rétention en eau des sols a été déterminée selon la méthode « Flugschrift FAW Nr. 113 » de Gysi et von Allmen (1995).

Stabilité des agrégats de sol

La stabilité des agrégats du sol a été déterminée selon la méthode de Kemper et Koch, 1966 (selon Schinner, 1993).

2.5 Effet du digestat liquide sur la réceptivité des sols aux maladies telluriques

L'influence du digestat liquide sur la réceptivité des sols aux maladies telluriques a été étudiée avec deux systèmes plantes-pathogène : *Pythium ultimum* – cresson et *Rhizoctonia solani* – basilic. Le principe de ces tests est de comparer les symptômes de maladies des plantes dans les sols non fertilisés, fertilisés avec de l'engrais du commerce ou fertilisés avec du digestat liquide. Pour ce faire, divers quantité d'agents pathogènes sont introduites dans le sols avant le semis des plantes, puis l'évolution des symptômes est observée.

Production des inocula des champignons pathogènes

La souche de *Pythium ultimum* 5808, agent pathogène de la maladie de fonte de semis, ainsi que la souche de *Rhizoctonia solani* RS1733, agent pathogène de la pourriture des racines de basilic, ont été conservées sur milieu de malt gélosé.

La production de l'inoculum a été faite sur des graines de millet doré bio. Pour cela, 15 ml d'eau déminéralisée sont ajoutés à 25 g de graines de millet, le tout étant alors autoclavé 20 minutes à 121 °C. Trois rondelles de 0,8 cm de diamètre de l'agent pathogène désiré, prélevées sur les cultures sur milieu de malt gélosé, y ont alors été ajoutées. Après 7 jours pour *P. ultimum* ou trois semaines pour *R. solani*, l'agent pathogène est haché avec un hachoir à oignon, puis dilué dans du sable pour être inoculé dans la terre. Diverses quantités d'agent pathogène sont ainsi ajoutées aux sols.

Tab. I: Caractéristiques des terres employées pour les essais réalisés au FiBL¹.

Paramètre	Unité	Terre noire	Terre maraîchère	Terre horticole 1	Terre horticole 2
Teneur en humus	% p/p	4,5	2,0	3,0	3,0
Teneur en argile	% p/p	11,0	11,0	16,0	11,0
Teneur en limon	% p/p	31,0	21,0	21,0	21,0
Valeur pH (extrait 1 :2,5 H ₂ O)		7,6	8,0	7,6	7,1
<u>Éléments disponibles (extrait H₂O 10)</u>					
Nitrate	mg/kg	78,1	21,7	90,7	9,4
Phosphore	mg/kg	13,0	2,0	6,3	3,4
Potasse	mg/kg	31,5	34,1	391,7	12,0
Calcium	mg/kg	242,3	158,1	205,5	107,7
Magnésium	mg/kg	15,7	10,1	27,9	8,8
<u>Éléments de réserve (extrait AA E10)</u>					
Phosphore	mg/kg	349,6	36,4	281,7	86,8
Potasse	mg/kg	146,3	96,5	904,1	79,3
Calcium	mg/kg	21890,0	57730,0	10140,0	3961,0
Magnesium	mg/kg	419,2	505,9	376,2	141,1
<u>Oligoéléments</u>					
Bore	mg/kg	0,9	0,6	1,3	0,8
Manganèse	mg/kg	163,0	199,2	266,0	189,0
Cuivre	mg/kg	14,4	5,5	6,8	7,9
Fer	mg/kg	656,0	385,0	559,0	232,0

¹Analyses: Ibu, Labor für Boden- und Umweltanalytik, Eric Schweizer AG, CH-3602 Thun.

Tab. 2: Caractéristiques des digestats liquides utilisés pour les essais réalisés dans le cadre du projet OFAG-Biogreenhouse.

Paramètre	Unité	Pratteln juillet 2017 ^{1,4}	Pratteln nov. 2019 ^{3,4}	Pratteln déc. 2019 ^{1,4}	Vétroz janvier 2017 ^{2,6}	Vétroz février 2017 ^{2,6}	Vétroz février 2018 ^{2,6}	Wauwil mai 2018 ^{1,4}
Matière sèche (MS 105°C)	% MF	14,4	13,0	11,2	15,5	14,9	19,0	18,1
Perte au feu (MO 500°C)	% MS	48,0	52,0	62,4	59,1	60,8	53,0	56,9
Carbone organique	g / kg MS	278	260	362	-	-	265	250
Valeur pH		8,3	7,9	7,8	7,6	7,8	8,0	8,1
N _{tot} (d'après Kjeldahl)	g/kg MS	39,4	41,1	46,2	32,7	32,7	27,6	31,8
NH ₄ -N	g/kg MS	15,9	13,1	21,0	7,5	8,9	3,6	9,86
NO ₃ -N	g/kg MS	-	-	-	-	-	-	-
Rapport C/N		7,1	6,3	7,8-	-	-	9,6	7,84
Phosphore P ₂ O ₅	g/kg MS	13,61	17,4	16,5	16,4	19,1	10,6	14,38
Potasse K ₂ O	g/kg MS	26,63	17,4	16,5	32,7	38,6	32,5	30,53
Calcium	g/kg MS	30,2	35,0	37,9	43,7	50,9	43,0	27,1
Magnésium	g/kg MS	5,83	6,2	5,5	6,2	6,8	7,6	5,71
Soufre	g/kg MS	3,65	-	-	-	-	-	3,19

¹Analyses: Ibu, Labor für Boden- und Umweltanalytik, Eric Schweizer AG, CH-3602 Thun.

²Analyses: Sol-Conseil, laboratoire et bureau d'étude, Route de Nyon 21, CH-1196 Gland.

³Analyses: Wessling AG, Werkstrasse 27, CH-3250 Lyss.

⁴Digestat liquide provenant de l'installation de méthanisation type „Kompogas“ de Pratteln (exploitant: Leureko AG, Laufenburg-AG).

⁵Digestat liquide, tamisé à 0,14mm, provenant de l'installation de méthanisation type „Kompogas“ de Wauwil (LU), exploitant : Axpo Kompogas, Wauwil-LU.

⁶Digestat liquide, centrifugé, provenant de l'installation de méthanisation type „Kompogas“ de Vétroz (VS), exploitée par EcoBois Recyclage SA.

Test de receptivité *Pythium ultimum* - cresson

Pythium ultimum attaque les plantes lors de la germination des graines. De ce fait, une forte diminution de croissance des plantes est observée en cas d'attaque.

Pour la réalisation du test, différentes quantités de *P. ultimum* (sous forme de mélange inoculum millet + sable) sont mélangées aux terres testées. Par modalité et quantité d'inoculum, 6 pots de 80 ml sont remplis avec ces terres, puis 0,5 g de graines de cresson de jardin (*Lepidium sativum* L.) sont semés à la surface des pots et arrosés. Les pots sont alors couverts avec une feuille plastique pour maintenir une humidité suffisante de la surface des pots pour permettre une bonne germination des graines. Après 5 à 7 jours de croissance par une température de 22°C et 16h de lumière par jour, le poids frais des plantes de cresson par pot est déterminé.

Test de receptivité *Rhizoctonia solani* - basilic

Une fois les plantes levées, *Rhizoctonia solani* les attaque au niveau de l'hypocotyle. Les jeunes plantes versent et meurent.

Pour la réalisation du test, des pots de 9 cm de diamètre et d'un volume de 285 ml sont utilisés ; 6 pots par modalité et quantité d'inoculum sont utilisés. Environ 1 cm des terres testées est placé au fond de chaque pot, puis différentes quantités de *R. solani* (sous forme de mélange inoculum millet + sable) sont placées sur cette couche de terre, puis les pots sont remplis avec la même terre que celle mise au fond du pot. Environ 20 graines de basilic sont semées par pot et couvertes avec 3 mm de vermiculite. Les pots sont ensuite placés à 24°C avec un régime de lumière de 16h par jour. Après environ 2 semaines, le taux de germination des plantes par pot est compté ; le comptage des plantes vivantes par pot est ensuite effectué de manière hebdomadaire pendant 4 semaines. Sur la base de ces comptages, le taux de mortalité des plantes de basilic par pot est alors calculé.

2.6 Influence de la stratégie de fertilisation sur le lessivage de l'azote

Lors des essais en bacs réalisés à Frick (voir chap. 2.9), l'eau de lessivage de chaque bac est collectée individuellement dans des bouteilles en plastique. Ses bouteilles sont régulièrement vidées. Lors de cette opération, la quantité d'eau lessivée est régulièrement mesurée et un échantillon de chaque bouteille est prélevé pour être ensuite analysé quant à sa teneur en azote minéral. Ainsi, un suivi précis de l'azote lessivé par bac peut être réalisé.

2.7 Influence de la stratégie de fertilisation sur les pertes ammoniacales

L'évaluation des pertes d'azote ammoniacal suite à l'apport du digestat liquide a été réalisée en laboratoire par RITMO Agroenvironnement à Colmar (www.rittmo.com). Pour cela, les pertes par volatilisation de l'azote ammoniacal après l'apport de différentes doses de digestat liquide ont été mesurées au moyen d'un système clos à flux dynamique. Le suivi s'est fait sur une période de 15 jours avec sept prélèvements effectués pendant ce laps de temps. Trois références ont été utilisées lors de ces essais : sol sans apport de fertilisants, sol fertilisé avec des engrais bio du commerce utilisés dans les essais en bacs (voir chap. 2.9), et le sol fertilisé avec un engrais azoté minéral (urée).

Ces mesures ont été réalisées sur les deux sols utilisés dans les essais en bacs 2018 (« terre maraîchère » et « terre horticole 2 », voir chap. 2.1).

Pour la réalisation des essais, les terres testées sont préalablement tamisées à 2 mm. 150g de sol sec tamisé sont placés dans des bouteilles de 500 ml, après humidification des sols et application des produits, ces bouteilles sont branchées au dispositif de volatilisation et placées à 20°C pendant 15 jours. Un flux d'air (4 l/min) généré par des pompes d'aquarium, est humidifié par barbotages successifs à travers une solution d'acide sulfurique et de l'eau déminéralisée. L'air humidifié passe ensuite dans une chambre de volatilisation contenant les échantillons de sol et de produits. En sortie de ces chambres de volatilisation, l'air chargé en NH₃ est acheminé dans un tube contenant 50 ml d'acide sulfurique (0.1N). L'ammoniac y est alors fixé. L'analyse en laboratoire de la solution acide fournit la quantité en azote ammoniacal (N-NH₄⁺), ce qui permet de calculer la quantité d'ammoniac gazeux volatilisé. Sauf indication contraire, l'ensemble des traitements est réalisé avec cinq répétitions. Les diverses quantités de digestat liquide apportées à la terre ont été calculées sur la base des essais en bacs et correspondent à un apport de fertilisation pratique avec concentration des apports sous les lignes de tomates (soit sur 1/3 de la surface totale) et en considérant les premiers 10 cm du sol. Ces données sont présentées dans le tableau Tab. 3

Tab. 3. Quantités planifiées et effectives d'azote apportées lors des essais de volatilisation de l'azote.

Fertilisant	Urée	Engrais bio ¹	Digestat liquide pour « terre maraîchère »				Digestat liquide pour « terre horticole 2 »			
			D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
N _{tot} fertilisé planifié [kg/ha]	-	206	31	92	244	486	31	92	244	486
N _{disp} fertilisé planifié [kg/ha]	-	170	22	64	170	341	22	64	170	341
N _{tot} fertilisé planifié [mg/litre de terre d'essai] ²	-	571	86	254	677	1353	86	254	677	1353
N _{disp} fertilisé planifié [mg/litre de terre d'essai] ²	-	472	60	178	473	947	60	178	473	947
Quantité d'engrais par test (150 ml sol) en mg resp. ml ³	217	180	2,3	6,6	17,6	35,3	2,3	6,6	17,6	35,3
mg N _{tot} effectif fertilisé par test	100	70,8	12,0	35,4	94,2	188,3	11,6	34,3	91,2	182,4
mg N _{tot} effectif fertilisé par litre de terre d'essai	667	472	80	236	628	1255	77	229	608	1216

¹ mélange de 19,5% de raclure de corne, 58% de fumier de poules et 22,5% de Patentkali®

² on considère pour ce calcul une fertilisation sur 36% de la surface de la serre donnée dans les premiers 10 cm du sol

³ urée et engrais bio : valeur en mg ; digestat liquide : valeur en ml

2.8 Essai tomates en pots

Le substrat Ricoter 127 a été utilisé pour cet essai en pot.

Le digestat utilisé a été fourni par EcoBois Recyclage SA à Vétroz. Il a été stocké au réfrigérateur à 12°C. Pour l'essai, le digestat a été pris en trois fois chez EcoBois (semaines 20, 25 et 32).

La fumure de fond apportée pour les modalités bio a été calculée pour couvrir 50 % des besoins en éléments nutritifs. Les quantités à apporter ont été calculées selon les normes de fumure pour un rendement de 12 kg/m² (soit en kg/ha 170 N, 80 P₂O₅, 340 K₂O et 60 Mg). Pour le calcul de la fertilisation azotée, 70 % de l'azote total du digestat liquide et des autres engrais organiques (Biorga Vianos, Biorga raclures de corne, Biorga NK engrais liquide) a été considéré, comme préconisé par Suisse Bilan. Les fumures de fond ont été amenées lors de la plantation.

L'essai a été réalisé sur la variété Kanavaro, greffée sur Maxifort. Les plants à deux têtes ont été produits par Agroscope.

Conduite de la culture de tomates

La culture a été faite en pot de 10 litres pour un contrôle optimal des paramètres. Un dispositif de récupération des drainages séparé pour chaque parcelle a été mis en place (Fig. 1). L'essai a été réalisé dans une serre de type Venlo avec une hauteur de 4,7 mètres et une surface d'environ 360 m². La serre est équipée d'un écran thermique (LUXOUS 1347 FR) et d'un écran d'ombrage (HARMONY 3315 O FR) de chez Svensson. Un dispositif en blocs à quatre répétitions a été utilisé. Une parcelle élémentaire était constituée de 9 plantes. La densité était de 2.35 tiges/m².



Fig. 1. Mise en place de l'essai Agroscope-Les Fougères 2017 en pots, avec dispositif de récupération du drainage indépendant pour chaque parcelle. (Photo: G. Mottier).

Cinq modalités sont comparées (le pourcentage correspond au % de la norme (Neuweiler & Krauss, 2017) de fumure recommandée) :

- Fumure bio : fumure de fond (50 %) et fertilisation avec des engrais du commerce homologués pour l'agriculture biologique (50 %), apport chaque semaine
- Digestat dose 50 : fumure de fond (50 %) et digestat liquide (50 %), apport chaque semaine
- Digestat dose 50 fractionnée : fumure de fond (50 %) et digestat liquide (50 %), apport en trois fois
- Digestat dose 100 : digestat liquide (100 %), apport chaque semaine
- Fumure minérale : fumure de fond (50 %) et fumure minérale liquide (50 %), apport chaque semaine

Les quantités effectives d'éléments fertilisants apportés sont résumées dans le tableau Tab. 4.

Les données de phénologie et de rendement ont été traitées avec une ANOVA (analyse de la variance) suivie d'un test de Tukey (limite à 5%) (XLSTAT). Les distributions dont l'hypothèse de normalité n'était pas acceptable, ont été traitées avec un test de Kruskal-Wallis suivi de la méthode de comparaisons multiples de Dunn (niveau de signification à 5%) (XLSTAT).

Tab. 4. Quantités effectives d'éléments fertilisants apportés lors de l'essai tomates 2017 en pots [en kg/ha].

Modalité	N _{disp.}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Remarques
Digestat dose 100	170.5	142.3	340.0	61.1	Total apport hebdomadaire et fumure de fond (uniquement Patenkali)
Fumure minérale	170.0	34.9	141.1	60.0	Total fumure de fond et apport hebdomadaire
Digestat dose 50	170.3	111.1	340.0	63.4	Total fumure de fond et apport hebdomadaire de digestat
Fumure bio	170.0	40.0	339.9	38.5	Total fumure de fond et apport hebdomadaire
Digestat dose 50 fractionnée	170.3	111.1	340.0	63.4	Total fumure de fond et apport du digestat en 3 fois

2.9 Essais tomates en bacs

Deux essais tomates en bacs ont été réalisés dans un tunnel plastique du FiBL à Frick. Le premier essai a débuté à la mi-mai 2017 et a été achevé début octobre 2017. Le deuxième essai a débuté à la mi-mai 2018 et a été achevé à la mi-octobre 2018.

Tomates

En 2017, des plantons de tomates greffés de la variété « Sweet Million F1 » produits par « Schwarz Jungpflanzen » à Villigen (AG) ont été utilisés. En 2018, des plantons de tomates greffés de la variété Cherry « Favorita F1 » produits par « Jud Bio-Jungpflanzen AG » à Tägerwilen (TG) ont été utilisés.

Conduite de la culture de tomates

Pour les essais en bacs, la culture de la tomate a été réalisée dans un tunnel de production non chauffé du FiBL à Frick (Fig. 2 et Fig. 3). Cinq répétitions par modalité et terre ont été mises en place.

La culture des tomates a été réalisée dans des bacs Euro d'une contenance de 25 litres (dimension d'un bac : 40 x 30 x 27 cm). L'arrosage a été réalisé avec un système d'irrigation avec des goutteurs CLN. Un tissu drainant Tricodrain 823 (Tegum AG, Frauenfeld-TG) a été disposé au fond de chaque bac et un tuyau permettant de collecter l'eau de drainage coulant des bacs a été installé. L'eau de drainage de chaque bac a été régulièrement collectée et sa quantité ainsi que sa teneur en azote minéral mesurée.

La régulation de l'arrosage automatique a été délicate au début de l'essai 2017. L'apport d'eau a été un peu faible fin-mai début-juin, toutefois sans que les plantes ne montrent de flétrissement anormal pendant cette période. En 2018, la régulation de l'arrosage automatique s'est bien passée pour ce qui est des apports d'eau.

L'apport de digestat liquide a été effectué manuellement en 2017. En 2018, un préfiltre a été installé, puis des goutteurs CLN ont été employés. Lors de ces opérations, des problèmes de colmatage des goutteurs a souvent été observé et dus être combattus.

Pour chaque terre, cinq modalités ont été comparées :

- Tn : témoin non fertilisé
- Tf : témoin fertilisé avec des engrais du commerce homologués pour l'agriculture biologique (apport des fertilisants au moment de la plantation des tomates)
- Dn1 : digestat liquide, dose normale, apporté en une fois juste après la plantation des tomates
- Dn3 resp. Dn/h : digestat liquide, dose normale, apporté en trois fois pendant la culture des tomates (en 2017), resp. de manière bi-hebdomadaire pendant 16 semaines (en 2018)
- Dh3 resp. Dh/h : digestat liquide, dose triple, apporté en trois fois pendant la culture des tomates (en 2017), resp. de manière hebdomadaire pendant 16 semaines (en 2018)

Les journaux des essais avec les plans de fertilisation réalisés sont présentés dans les tableaux Tab. 5 à Tab. 8.



Fig. 2: Mise en place de l'essai tomate 2017 en bacs dans le tunnel de production du FiBL à Frick.



Fig. 3. Vue de l'essai tomate 2018 en bacs dans le tunnel de production du FiBL à Frick.

De manière générale, la température dans l'air ambiant avait de relativement grosses fluctuations (Fig. 4 et Fig. 5). Les bacs, étant placés au-dessus du sol (Fig. 2 et Fig. 3), avaient une variation de température plus importante que la température dans le sol du tunnel (Fig. 4 et Fig. 5); en 2017, la température des bacs a même été supérieure à 35°C pendant de courtes périodes (Fig. 4). En 2018, la température dans les bacs était légèrement plus faible qu'en 2017 (Fig. 5).

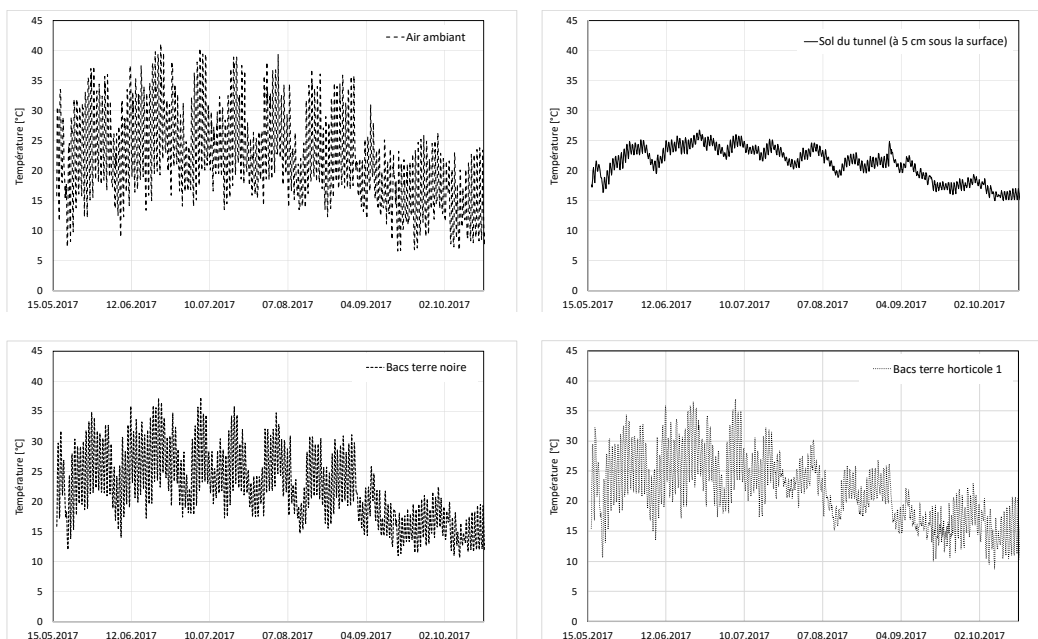


Fig. 4. Evolution de la température dans les bacs d'essais pendant la culture des tomates 2017.

Chaque point est la moyenne de 3 mesures (pour les bacs), de 4 mesures (pour le sol du tunnel) ou de 5 mesures (pour l'air ambiant).

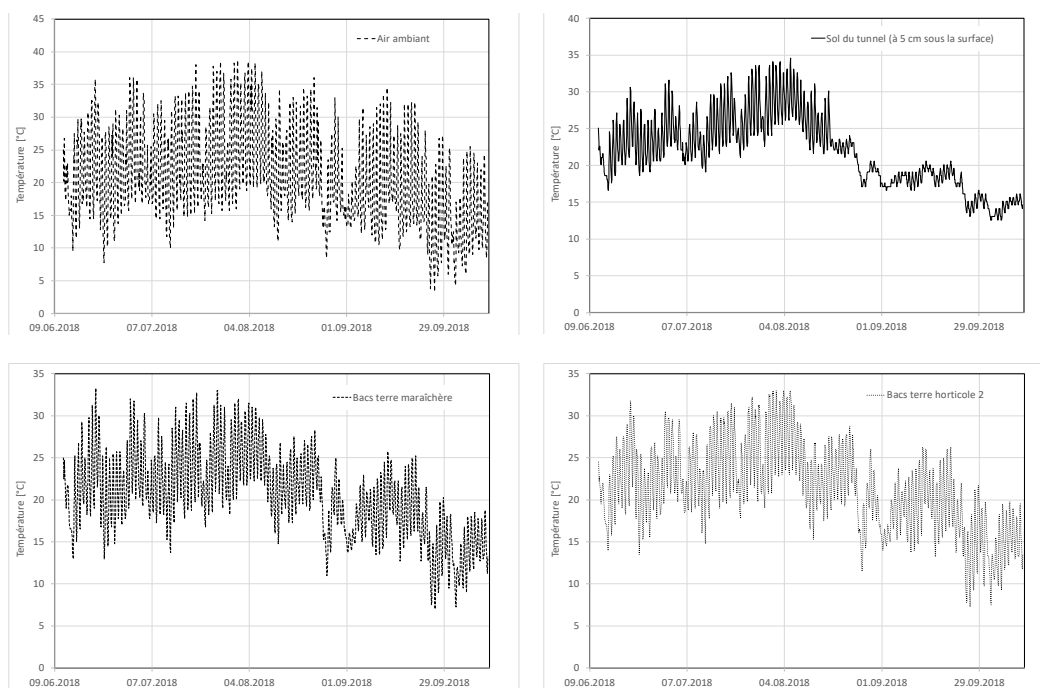


Fig. 5. Evolution de la température dans les bacs d'essai pendant la culture des tomates 2018.
Chaque point est la moyenne de 2 mesures (pour les bacs et pour l'air ambiant) ou une mesure (pour le sol du tunnel).

Tab. 5. Journal de l'essai tomate 2017 en bacs.

Date	Jour	Opération	Remarques
15.05.2017	0	Mise en place des bacs	
15.05.2017	0	Fertilisation de la modalité Tf	Par bac de 25 litres ¹ : - 28,1 g de raclure de corne - 83,3 g de fumier de poules - 32,2 g de Patentkali®
15.05.2017	0	Plantation des tomates	Variété « Cherry Sweet »
29.05.2017	14	1 ^{er} apport de digestat liquide	Modalités Dn1 ² , Dn3 ³ et Dh3 ⁴
22.06.2017	38	2 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn3 ³ et Dh3 ⁴
11.07.2017	63	3 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn3 ³ et Dh3 ⁴
11.10.2017	149	Fin de l'essai	

¹ Correspond à : par bac 5,7 g N_{disp.}, 3,3 g P₂O₅, 11,3 g K₂O et 0,1 g Mg, ce qui fait pour 30'000 plantes : 170 kg N_{disp.}, 100 kg P₂O₅, 340 kg K₂O et 58 kg Mg

² Quantité par bac (en litre): 1,5 (= 8,5 g N_{tot}) (= 6,0 g 70% de N_{tot} / bac, = 180 kg/30'000 plantes)

³ Quantité par bac (en litre): 0,52 (= 2,95 g N_{tot}) (= 2,1 g 70% de N_{tot} / bac, = 62 kg/30'000 plantes)

⁴ Quantité par bac (en litre): 1,5 (= 8,5 g N_{tot}) (= 6,0 g 70% de N_{tot} / bac, = 180 kg/30'000 plantes)

Tab. 6. Quantités effectives d'éléments fertilisants apportées lors de l'essai tomate 2017 en bacs [en kg/ha pour une densité de 30'000 plantes / ha].

Modalité	N _{total}	N _{disp.}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Remarques
Témoin fertilisé (Tf)	205,5	170,1	100,0	339,8	58,0	en 1x avant plantation
Digestat dose normale (Dn)	255,3	178,7	122,6	260,3	48,7	en 1 ou 3x après plantation
Digestat dose haute (Dh)	765,9	536,1	367,8	780,8	146,0	en 3x après plantation

Tab. 7. Journal de l'essai tomate 2018 en bacs.

Date	Jour	Opération	Remarques
10.05.2018	0	Mise en place des bacs	
10.05.2018	0	Fertilisation de la modalité Tf	Par bac de 25 litres : - 28,1 g de raclure de corne - 83,3 g de fumier de poules - 32,2 g de Patentkali®
10.05.2018	0	Plantation des tomates	Variété « Favorita FI »
28.05.2018	18	1 ^{er} apport de digestat liquide	Modalités Dn/l ² , Dn/h ³ et Dh/h ⁴
11.06.2018	32	2 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn/h ³ et Dh/h ⁴
14.06.2018	35	1 ^{ère} mesure SPAD	
25.06.2018	46	3 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn/h ³ et Dh/h ⁴
09.07.2018	60	4 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn/h ³ et Dh/h ⁴
09.07.2018	60	2 ^{ème} mesure SPAD	
23.07.2018	74	5 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn/h ³ et Dh/h ⁴
06.08.2018	88	6 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn/h ³ et Dh/h ⁴
07.08.2018	89	3 ^{ème} mesure SPAD	
20.08.2018	102	7 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn/h ³ et Dh/h ⁴
03.09.2018	116	8 ^{ème} apport de digestat liquide	Modalités Dn/h ³ et Dh/h ⁴
20.09.2018	133	Couper les têtes des plantes	
11.10.2018	154	Fin de l'essai	

¹ Correspond à : par bac 5,7 g N_{disp.}, 3,3 g P₂O₅, 11,3 g K₂O et 0,1 g Mg, ce qui fait pour 30'000 plantes : 170 kg N_{disp.}, 100 kg P₂O₅, 340 kg K₂O et 58 kg Mg

² Quantité par bac (en litre): 1,4 litres (= 8,1 g N_{tot}) (= 5,6 g 70% de N_{tot} / bac, = 170 kg/30'000 plantes)

³ Quantité par bac (en litre): 0,175 litres (= 1,0 g N_{tot}) (= 0,7 g 70% de N_{tot} / bac, = 21 kg/30'000 plantes)

⁴ Quantité par bac (en litre): 0,525 litres (= 2,1 g 70% de N_{tot} / bac, = 63 kg/30'000 plantes)

Tab. 8. Quantités effectives d'éléments fertilisants apportées lors de l'essai tomate 2018 en bacs [en kg/ha pour une densité de 30'000 plantes / ha].

Modalité	N _{total}	N _{disp.}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Remarques
Témoin fertilisé (Tf)	205,5	170,1	100,0	339,8	58,0	en 1x avant plantation
Digestat dose normale (Dn)	241,8	169,2	94,2	179,0	37,7	en 1 ou 8x après plantation
Digestat dose haute (Dh)	725,4	507,8	282,6	637,0	113,0	en 8x après plantation

2.10 Essai tomates en pleine terre

Deux essais en pleine terre ont été réalisés dans les serres de la station de recherche Agroscope des Fougères à Conthey : un en 2018 et un en 2019. Le but de ces essais était de tester sous des conditions de la pratique des meilleures stratégies d'apports sélectionnées grâce aux essais en bacs et en pots.

Fertilisation

La fertilisation de la culture a été faite selon les normes de fumure.

La fumure de fond apportée (au maximum 50% des besoins en éléments nutritifs peuvent être couverts par les digestats liquides, selon les normes bio Suisse) contient : Kalisop® (50 % de K₂O), Biorga Vianos® (9% N, 12% P₂O₅), raclures de cornes (14 % de N) et Patentkali® (3 % K₂O et 6 % de Mg). Les quantités à apporter en 2018 ont été calculées selon les normes de fumure pour un rendement de 13.5 kg/m² (soit en kg/ha 191,3 de N, 90 de P₂O₅, 382,5 de K₂O et 67,5 de Mg) et selon les résultats de l'analyse de sol avant plantation (Tab. 9). En 2019, les quantités de fumure ont été calculées pour un rendement de 18 kg/m².

Pour le calcul de la fertilisation azotée, 70% de l'azote total du digestat liquide et des autres engrais organiques (Vianos, raclures de corne, Biorga NK engrais liquide) a été considéré, comme préconisé par Suisse Bilan.

Les fumures de fond ont été amenées au moment de la plantation. Les quantités de fertilisants sont résumées dans le Tab. 10.

Le digestat utilisé provient de l'installation type Kompogas de Vétroz. Il a été stocké au réfrigérateur à 12°C. Pour le calcul de la fumure, l'analyse du digestat de février 2018 a été utilisée (Tab. 2). Le digestat utilisé dans l'essai est filtré, dilué à 50% puis laissé à décanter une nuit avant l'apport.

Tomates

L'essai 2018 a été réalisé sur la variété de tomates Kanavaro, greffée sur Maxifort, à deux têtes par plant. L'essai 2019 a été réalisé sur la variété Tomicia greffée sur Emperor.

Tab. 9. Caractéristiques du sol de l'essai de culture de tomates en pleine terre 2018 avant plantation^{1, 2}.

Paramètre	Unité	Témoin bio	Digestat 3x	Digestat hebdo
N	mg/kg	24,5	28,7	33,2
P	mg/kg	0,3	0,4	0,4
K	mg/kg	23,5	27,0	23,3
Ca	mg/kg	84,4	86,1	85,6
Mg	mg/kg	9,8	10,1	9,2
pH	-	8,1	8,1	8,1
Conductibilité (EC)	µSiem/cm	520,9	536,3	524,2
MO	%	2,2	2,2	2,0

¹Analyses : Sol-Conseil, laboratoire et bureau d'études, Route de Nyon 21, 1196 Gland

²Valeurs moyennes sur quatre répétitions (extraits H2O VI :1.5 sauf MO Corg)

Tab. 10. Quantités d'éléments fertilisants apportées dans la variante digestat liquide à la culture de tomate dans les essais en pleine serre (quantités prévues).

Année d'essai	Fumure de fond [kg/ha]				Fumure liquide [kg/ha]			
	N _{disp.}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	N _{disp.}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg
2018	95,6	76,5	325,1	10,1	95,6	76,5	325,1	10,1
2019	125,0	85,0	312,5	52,5	125,0	71,5	221,4	50,0

Conduite des cultures de tomates

Les cultures ont été faites dans une serre de type Venlo avec une hauteur de 4.7 mètres et une surface d'environ 360 m². Les consignes climatiques étaient réglées à 16°C la nuit, 18°C le jour et l'aération à 20/22°C selon l'ensoleillement. La serre est équipée d'un écran thermique (LUXOUS 1347 FR) et d'un écran d'ombrage (HARMONY 3315 O FR) de chez Svensson. Un dispositif en blocs à quatre répétitions a été utilisé. Une parcelle élémentaire était constituée de 23 plantes.

La densité était de 2.8 tiges/m². La plantation a été faite le 28 mars 2018. La première fumure liquide a été apportée le 13 avril 2018 (16 jours après la plantation). La culture a pris fin le 13 septembre 2018. Le suivi de culture 2018 est décrit dans le Tab. 11. La culture 2019 s'est déroulée selon le même schéma avec une plantation le 1^{er} avril 2019 et une dernière récolte le 11 septembre 2019, avec des apports de fumure liquide hebdomadaire (variantes « témoin bio » et « digestat hebdo ») resp. toutes les 4 semaines (variante « digestat mensuel »).

Description des modalités testées

En 2018, trois modalités sont comparées (le pourcentage correspond au % de la norme (Neuweiler & Krauss, 2017) de fumure recommandée) :

- Témoin bio : fumure de fond (50%) et fertilisation avec des engrais du commerce homologués pour l'agriculture biologique (50%), apport chaque semaine
- Digestat 3x : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en trois fois durant la culture (6 apports au total)
- Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport chaque semaine (20 apports au total)

Les apports d'engrais hebdomadaires étaient effectués le lundi. Les quantités d'éléments fertilisants apportées par modalité sont résumées dans le Tab. 12. Le digestat pour la modalité Digestat hebdo est apporté par le système de fertigation (de la même manière que l'engrais du commerce pour le témoin bio) ; le digestat pour la modalité Digestat 3x est apporté manuellement à l'arrosoir directement au pied des tomates.

En 2019, quatre modalités sont comparées (le pourcentage correspond au % de la norme (Neuweiler & Krauss, 2017) de fumure recommandée) :

- Témoin sans fumure liquide: fumure de fond (50%)
- Témoin bio : fumure de fond (50%) et fertilisation avec des engrais du commerce homologués pour l'agriculture biologique (50%), apport chaque semaine
- Digestat mensuel: fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport chaque 4 semaines
- Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport chaque semaine

Essai mâche suite à la culture de tomates

Après la culture de tomates réalisée en 2019, de la mâche a été semée dans les parcelles d'essai pour étudier les effets résiduels de l'essai tomate. Aucune fertilisation n'a été faite dans la culture de mâche. La mâche de variété Agathe (Vilmorin) a été plantée le 3 octobre 2019 à une densité de 89 plantes par m², et a été récoltée le 5 novembre 2019. Agathe est une variété à croissance rapide et qui présente une bonne résistance au froid.

Tab. 11. Suivi de l'essai de culture de tomates en pleine terre 2018.

Date	Jour	Opération
21 mars 2018	-7	Fumure de fond
28 mars 2018	0	Plantation
13 avril 2018	16	Apport hebdomadaire de la première fumure liquide Premier apport digestat 3x (16%)
8 juin 2018	56	Première récolte
15 mai 2018	48	Deuxième apport digestat 3x (50%)
10 juillet 2018	104	Troisième apport digestat 3x (34%)
21 août 2018	146	Etêtage
13 septembre 2018	169	Fin de l'essai

Tab. 12. Quantités totales d'éléments fertilisants apportés lors de l'essai de culture de tomates en pleine terre 2018 [kg/ha].

Modalité	N _{disp.}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Remarques
Témoin bio	191,2	137,9	484,5	32	Total fumure de fond et apport hebdomadaire
Digestat 3x	191,2	136,3	559,2	56,9	Total fumure de fond et apport du digestat en 3 fois
Digestat hebdo	191,2	136,3	559,2	56,9	Total fumure de fond et apport hebdomadaire du digestat

Tab. 13. Quantités totales d'éléments fertilisants apportés lors de l'essai de culture de tomates en pleine terre 2019 [kg/ha].

Modalité	N _{disp.}	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Remarques
Témoin sans fumure liquide	125,0	85,0	312,5	52,0	Fumure de fond
Témoin bio	250,0	170,0	520,8	74,7	Fumure de fond et apport hebdomadaire
Digestat mensuel	250,0	156,4	533,9	102,0	Fumure de fond et apport mensuel du digestat
Digestat hebdo	250,0	156,4	533,9	102,0	Fumure de fond et apport hebdomadaire du digestat

2.1.1 Essai salades en pleine terre

Trois essais de salades en pleine terre ont été réalisés dans les serres de la station de recherche Agroscope des Fougères à Conthey : un en 2017, un en 2018 et un en 2019.

Fertilisation

La fertilisation des cultures a été faite selon les normes de fumure. La fertilisation de base a été réalisée dans les deux premiers essais avec du Vianos (9/9/5) et du Patentkali (30% K₂O) selon les besoins évalués après une analyse de sol. Pour le troisième essai, cette fertilisation de base a été réalisée avec du compost (10 m³/ha). La fertilisation liquide a été effectuée avec du digestat liquide ou du Biorga NK (6% N, 7% K₂O) pour la référence bio. Deux variantes d'application du digestat liquide ont été comparées : apport de la quantité totale juste avant la plantation, ou apport fractionnée avec la moitié juste avant la plantation et le deuxième environ 4 semaines plus tard.

Les informations de base des essais salades sont présentées dans le tableau Tab. 14.

Tab. 14. Description des données clés des essais salades réalisés à Conthey en pleine terre

Paramètre	Variantes	Essai 1 (2017-2018)	Essai 2 (2018-2019)	Essai 3 (2019-2020)
Témoin Bio	Fumure de fond			
	- Vianos [kg/are] - Patentkali [kg/are] - Compost [l/are]	2.5 4.7 -	- - -	- - 100.0
	Fumure liquide			
	- Biorga NK [l/are] - Digestat liquide [l/are]	- -	6,5 -	9,9 -
Digestat en 1 fois	Fumure de fond			
	- Vianos [kg/are] - Patentkali [kg/are] - Compost [l/are]	- 3.8 -	- - -	- - 100.0
	Fumure liquide			
	- Biorga NK [l/are] - Digestat liquide [l/are]	- 47.1	- 47.1	- 48.0
Digestat en 2 fois	Fumure de fond			
	- Vianos [kg/are] - Patentkali [kg/are] - Compost [l/are]	- 3.8 -	- - -	- - 100.0
	Fumure liquide			
	- Biorga NK [l/are] - Digestat liquide [l/are]	- 23.6 (x2)	- 73.5 (x2)	- 24.0 (x2)
Date de plantation		27.11.2017	28.11.2018	19.12.2019
Date de récolte		07.03.2018	01 et 08.03.2019	05.02.2020
Variété de salade		Brighton (semis à Agroscope)	Neil (plants bio)	Kimpala (plants bio)
Fertilisation				
Fumure de fond		16.11.2017	22.11.2018	18.11.2019
Fertilisation liquide		16.11.2017	22.11.2018	18.11.2019
bio		16.11.2017	22.11.2018	18.11.2019
1 ^{er} apport digestat		11.12.2017	23.12.2018	19.12.2019
2 ^{ème} apport digestat				

Conduite de la culture de salades

La culture a été faite dans une serre de type Venlo avec une hauteur de 4.7 mètres et une surface d'environ 360 m². Les consignes climatiques étaient réglées à 10°C la nuit, 12°C le jour et l'aération à 16°C lors de la plantation et pour une durée de 7 jours, ces mêmes consignes ont ensuite évolué à 5°C/10°C/15°C (nuit/jour/aération) jusqu'à atteindre des valeurs de 4°C/10°C/11-13°C lors de la pomaison. La serre

est équipée d'un écran thermique (LUXOUS 1347 FR) et d'un écran d'ombrage (HARMONY 3315 O FR) de chez Svensson. Un dispositif en blocs à quatre répétitions a été utilisé. Une parcelle élémentaire était constituée de 28 plantes. La densité était de 16 plantes/m².

2.12 Analyses statistiques des résultats

Les données de phénologie et de rendement ont été traitées avec une ANOVA (analyse de la variance) suivie d'un test de Tukey (limite à 5%) (XLSTAT). Les distributions dont l'hypothèse de normalité n'était pas acceptable, ont été traitées avec un test de Kruskal-Wallis suivi de la méthode de comparaisons multiples de Dunn (niveau de signification à 5%) (XLSTAT).

3. Résultats

3.1 Application des digestats liquides en serre : solutions techniques

Un essai sur basilic a été effectué en serre (Fig. 6) avec pour objectif de tester les trois systèmes d'épandage décrits précédemment :

- Goutteurs autorégulants à clapet et microtube type Netafim PCJ CNL 4 l/h (1,8 - 2 bars)
- Goutteurs autorégulants intégrés type UniRam à gaine semi-rigide 2,3 l/h (1,8 - 2 bars)
- Goutteurs à gaine souple type T-Tape 1 l/h (0,5 bars).

La solution de digestat a été préalablement tamisée (maille de 0,5 mm) et ensuite diluée à 50% avec de l'eau. Le nettoyage des filtres (maille de 100 microns) permet un gain relatif d'EC de 18% à 60% en fonction des systèmes de goutteurs (Tab. 15). La plus faible perte en EC et par conséquent en nutriment a été mesurée pour le système Netafim (18%), suivi du système UniRam (45%) et enfin T-Tape (60%).

L'EC a aussi été mesurée à l'entrée et à la sortie du filtre à lamelles avant et après le nettoyage de ce dernier. Avant nettoyage, une diminution d'EC a été mesurée dans une gamme comprise entre 0 et 50%. La plus forte diminution étant pour le système T-Tape. Une fois les filtres nettoyés, la différence d'EC était nulle ou très faible (<14% ~ 0.1 mS.cm⁻²).

L'apport en solution nutritive a été suivi pour chacun des systèmes de goutteurs pendant la culture de basilic (Fig. 7). Ce suivi, en particulier à partir du 18 juillet 2018, illustre parfaitement que le système T-Tape n'est en l'état pas adapté à la distribution du digestat liquide. Plusieurs nettoyages des filtres n'ont pas permis de maintenir le système T-Tape en place, il a dû être remplacé le 27 juillet 2018. Au contraire, les systèmes du type UniRam et NetaFim se sont avérés satisfaisants. Trois étapes de nettoyage des filtres (et/ou crépines) au cours de la culture ont permis un maintien de l'efficacité de distribution de la solution nutritive.



Fig. 6. Culture de basilic en serre permettant de tester les trois systèmes d'épandage de la fumure.

Tab. 15. Mesure de l'électroconductivité (EC) avant et après nettoyage des filtres¹.

Système d'épandage	Netafim		UniRam		T-Tape	
	Avant nettoyage des filtres	Après nettoyage des filtres	Avant nettoyage des filtres	Après nettoyage des filtres	Avant nettoyage des filtres	Après nettoyage des filtres
EC goutteur	0.6 ± 0.07	0.7 ± 0.07	0.6 ± 0.07	0.8 ± 0.00	0.25 ± 0.07	0.4 ± 0.14
EC avant lamelles	0.7	0.7	0.9	0.7	1.0	1.0
EC après lamelles	0.5	0.7	0.9	0.6	0.5	0.9

¹L'EC a été mesurée aux goutteurs, à l'entrée (avant lamelles) et à la sortie du filtre (après lamelles) à lamelles.

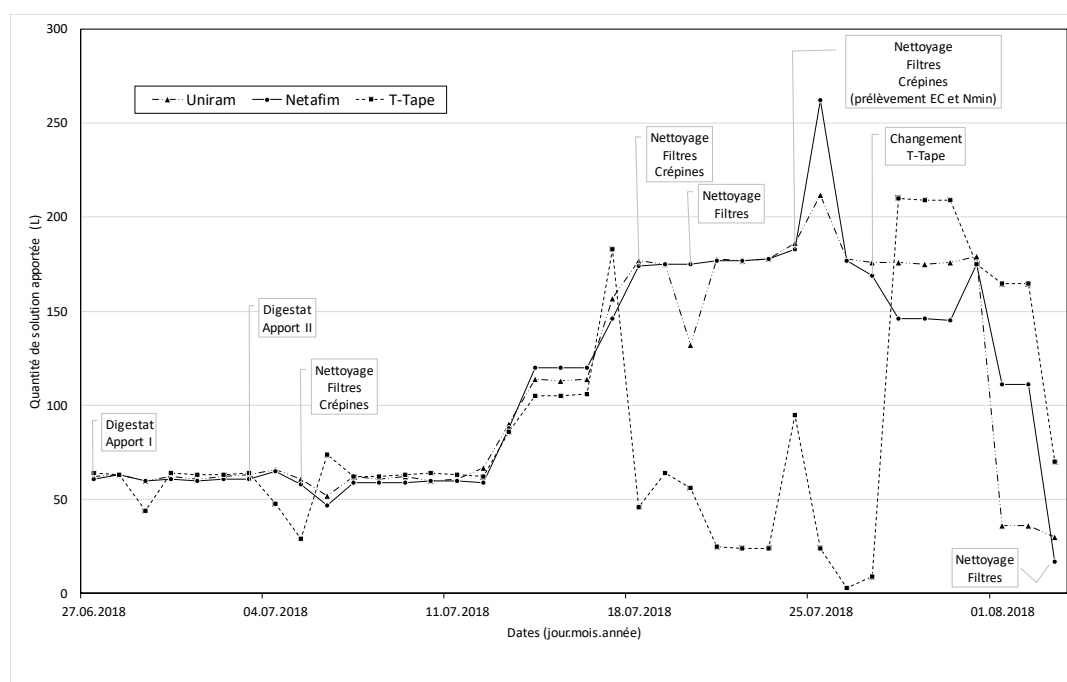


Fig. 7. Quantité de solution nutritive apportée en fonction du système de goutteurs.

3.2 Effets de la fertilisation sur la croissance des plantes et sur leurs productions

Essai en pots

Dans l'essai en pots réalisé aux Fougères, les diamètres des tiges étaient de manière générale très faibles, ce qui traduisait un manque de vigueur des plantes. Cela s'explique en partie par la culture en pots de relative petite dimension (10 litres). La modalité fertilisée qu'avec du digestat liquide (« digestat dose 100 ») présente un diamètre des tiges plus faible, des stades de floraison moins avancés, ainsi qu'une croissance hebdomadaire limitée; ces données sont significativement différentes des autres modalités (Tab. 16).

La teneur en chlorophylle (analyses SPAD) est significativement la plus élevée dans la modalité fumure bio et la plus faible dans la modalité digestat dose 100. Les autres modalités sont comparables entre elles et se situent entre les deux modalités précédentes (Tab. 16).

Tab. 16. Observations phénologiques et physiologiques des tomates lors de l'essai en pots réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2017¹

Modalité	Diamètre ² [cm] ³	Stade floraison ^{2, 3}	Elongation totale ² [cm] ³	Valeur SPAD
Fumure bio	6.1 AB	9.0 AB	230.9 A	50.48 A
Fumure minérale	6.6 A	9.5 A	235.8 A	47.87 B
Digestat dose 50	6.0 B	8.8 AB	218.5 AB	47.21 B
Digestat dose 50 fractionnée	5.8 B	8.0 BC	203.4 BC	47.41 B
Digestat dose 100	5.1 C	7.5 C	186.6 C	45.59 C

¹ Essai réalisé dans des pots de 10 litres remplis avec du substrat Ricoter 127, avec 1 plant de tomate de la variété Kanavaro greffée sur Maxifort par pot. La fertilisation a été ajustée à 170 kg d'azote disponible par hectare. Fumure bio : fumure de fond (50 %) et fertilisation hebdomadaire Biorga NK. Digestat dose 50 : fumure de fond (50 %) et digestat liquide en apports hebdomadaires (50 %).

Digestat dose 50 fractionnée : fumure de fond (50 %) et digestat liquide apport en trois fois (50 %). Digestat dose 100 : digestat liquide (100 %), apport chaque semaine. Fumure minérale : fumure de fond (50 %) et fumure minérale liquide en apports hebdomadaires (50 %).

²Diamètre : moyenne de 14 notations. Stade floraison : moyenne de la dernière notation. Elongation totale : moyenne de la dernière notation (moyennes sur quatre répétitions). Valeur SPAD : Moyenne de 12 notations (moyenne sur quatre répétitions).

³Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes à P<0,05 (test de Tukey).

Les rendements montrent un nombre de fruits plus élevé, ainsi qu'un rendement (kg/m²) supérieur dans la modalité fumure minérale et beaucoup plus faible pour la modalité digestat dose 50 fractionnée (Tab, 17, Fig 8 et Fig. 9). Au niveau de la qualité, les fruits résultant des plantes « digestat dose 100 » sont plus acides et un peu plus sucrés que les autres (Tab. 18 et Fig. 10). Ces fruits ont également un taux de matière sèche un peu plus élevé (Tab. 18 et Fig. 10).

Tab. 17. Influence de la stratégie de fertilisation sur les rendements cumulés de tomates commercialisables dans l'essai en pot réalisé à Agroscopie-les Fougères en 2017¹.

Modalité	Poids récolté [kg/m ²] ²	[Nombre de fruits par m ²] ²	Poids moyen [g/fruit] ³
Fumure bio	5.3 AB	44.8 AB	119.3 A
Fumure minérale	6.9 B	60.3 B	115 A
Digestat dose 50	4.4 AB	40.4 A	108 AB
Digestat dose 50 fractionnée	3.0 A	29.2 A	103.3 B
Digestat dose 100	4.3 AB	48.0 AB	90.3 C

¹Description de l'essai : voir Tab. 16.

²Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes à P<0,05 (test de Dunn).

³Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes à P<0,05 (test de Tukey).

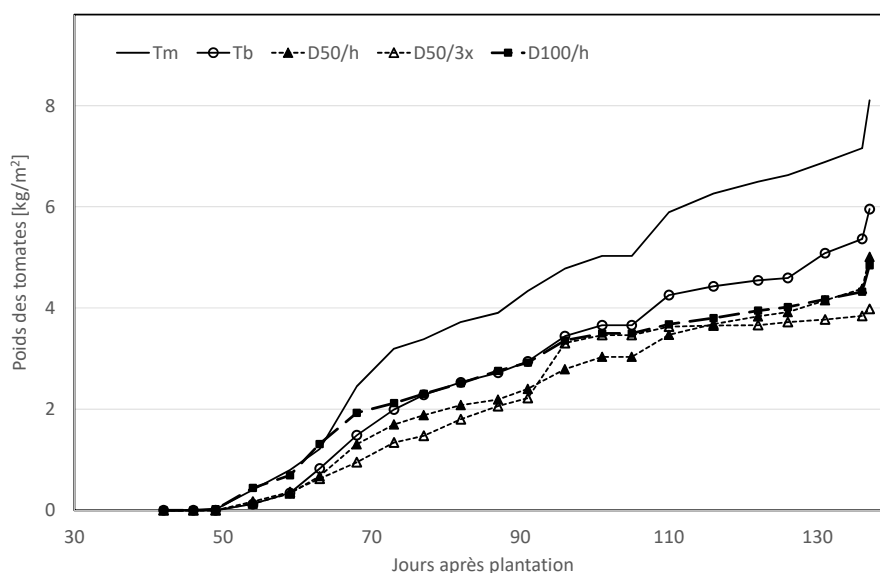


Fig 8. Influence de la stratégie de fertilisation sur les rendements totaux en tomates cumulés dans l'essai en pot réalisé à Agroscopie-les Fougères en 2017.

Essai réalisé dans des pots de 10 litres remplis avec du substrat Ricoter 127, avec 1 plant de tomate de la variété Kanavaro greffée sur Maxifort par pot. La fertilisation a été ajustée à 170 kg d'azote disponible par hectare.

Tm : témoin avec fumure minérale : fumure de fond (50 %) et fumure minérale liquide en apports hebdomadaires (50 %). Tb : témoin avec fumure bio : fumure de fond (50 %) et fertilisation hebdomadaire avec Biorga NK. D50/h : Digestat dose 50 : fumure de fond (50 %) et digestat liquide en apports hebdomadaires (50 %). D50/3x : Digestat dose 50 fractionnée : fumure de fond (50 %) et digestat liquide apport en trois fois (50 %). D10/h : Digestat dose 100 : digestat liquide (100 %), apport chaque semaine.

Rendements cumulés en kg/m² (moyenne sur quatre répétitions)

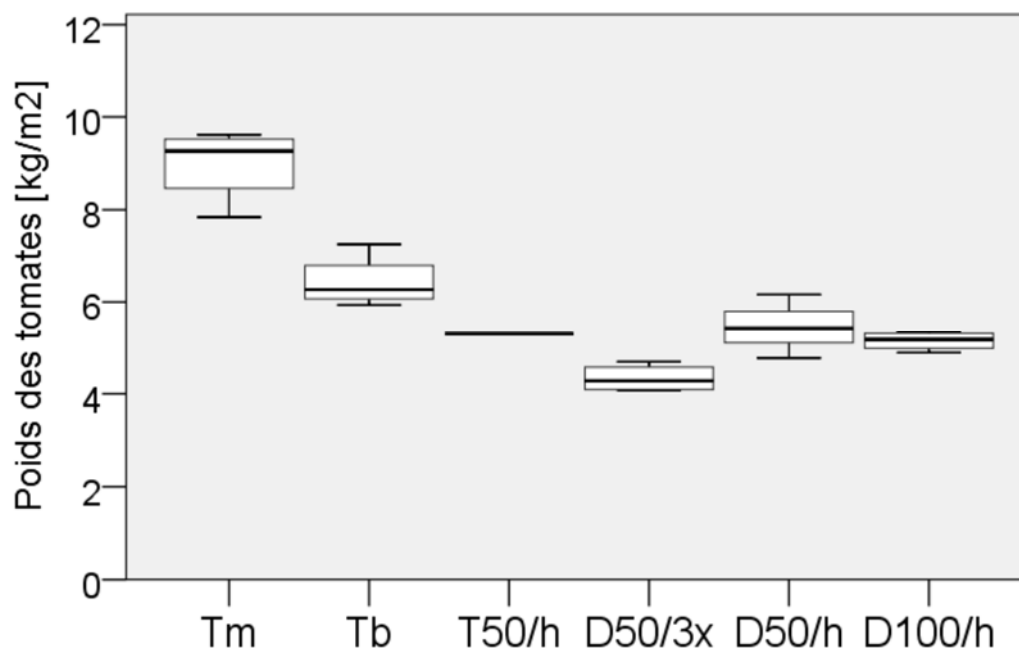


Fig. 9. Influence de la stratégie de fertilisation sur les rendements totaux en tomates cumulés dans l'essai en pot réalisé à Agroscope-les Fougères en 2017.

Description de l'essai : voir Fig 8.

Tm : témoin avec fumure minérale : fumure de fond (50 %) et fumure minérale liquide en apports hebdomadaires (50 %). Tb : témoin avec fumure bio: fumure de fond (50 %) et fertilisation hebdomadaire avec Biorga NK. D50/h : Digestat dose 50: fumure de fond (50 %) et digestat liquide en apports hebdomadaires (50 %). D50/3x : Digestat dose 50 fractionnée: fumure de fond (50 %) et digestat liquide apport en trois fois (50 %). D10/h : Digestat dose 100: digestat liquide (100 %), apport chaque semaine.

Chaque boîte à moustaches représente la moyenne de quatre répétitions.

Tab. 18. Influence de la stratégie de fertilisation sur la qualité des tomates dans l'essai en pot réalisé à Agroscope-les Fougères en 2017¹.

Modalité	Matière sèche [%] ²	Brix ²	Durofel ²	Acidité [g d'acide citrique/kg] ²
Fumure bio	6.1 B	4.6 B	93.6 B	3.6 A
Fumure minérale	6.0 B	4.5 B	93.9 B	3.2 A
Digestat dose 50	6.3 B	4.7 AB	92.3 AB	3.7 A
Digestat dose 50 fractionnée	6.5 AB	4.8 AB	93.3 B	3.5 A
Digestat dose 100	6.8 A	5.1 A	89.9 A	4.4 B

¹Description de l'essai : voir Tab. 16. Moyenne de deux notations avec quatre répétitions par modalité.

²Les valeurs suivies de lettres différentes sont significativement différentes à P<0,05 (test de Tukey).

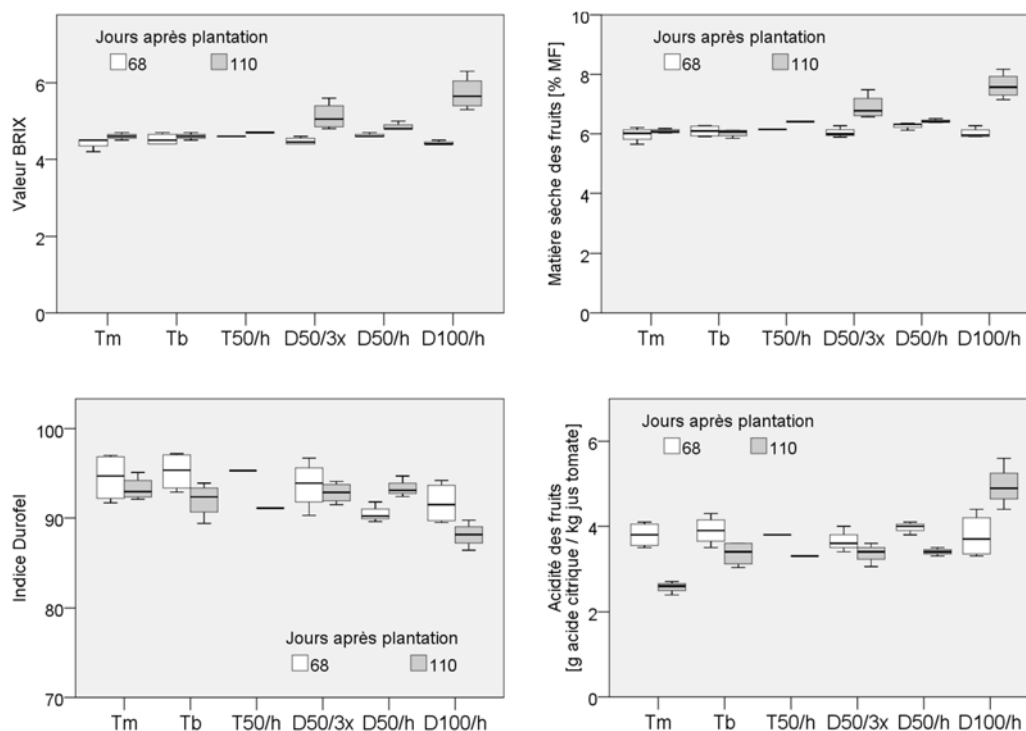


Fig. 10. Influence de la stratégie de fertilisation sur la qualité des tomates dans l'essai en pot réalisé à Agroscope-les Fougères en 2017.

Description de l'essai : voir Fig 8.

Tm : témoin avec fumure minérale : fumure de fond (50 %) et fumure minérale liquide en apports hebdomadaires (50 %). Tb : témoin avec fumure bio: fumure de fond (50 %) et fertilisation hebdomadaire avec Biorga NK. D50/h : Digestat dose 50 : fumure de fond (50 %) et digestat liquide en apports hebdomadaires (50 %). D50/3x : Digestat dose 50 fractionnée : fumure de fond (50 %) et digestat liquide apport en trois fois (50 %). D10/h : Digestat dose 100 : digestat liquide (100 %), apport chaque semaine.

Chaque boîte à moustaches représente la moyenne de quatre répétitions.

Essais en bacs

Les essais tomates en bacs se sont déroulés sans grands problèmes. Vu le volume restreint à disposition des racines (25 litres par plante), les plantes se sont développées de manière plus chétives que dans une production en pleine terre. Toutefois, leur croissance a été relativement homogène dans l'ensemble de l'essai. De manière générale, la croissance des plantes en 2018 a été meilleure qu'en 2017 ; peut-être que les températures légèrement inférieures dans les bacs de culture en 2018 y a joué un rôle.

En 2017, un nombre relativement important des feuilles a montré des symptômes de carence en phosphore. Dans la terre noire, aucune différence n'a été observée entre les modalités fertilisées (Fig. 11). Dans la terre horticole, la modalité fertilisée avec les engrais du commerce a montré moins de symptômes (Fig. 11). La température relativement élevée du sol dans les bacs d'essais pourrait jouer un rôle dans le développement de ces symptômes de carence, ces deux terres étant bien fournies en phosphore (Tab. 1). En 2018, les symptômes de carence en phosphore sur les plantes de tomates ont été moins importants, mais ont tout de même été observés, principalement dans la modalité non fertilisée (données non montrées). Ceci bien que les deux terres de 2018 étaient nettement moins riches en phosphore que celles de 2017 (Tab. 1).

Pour caractériser l'état physiologique des plantes, deux analyses SPAD ont été réalisées pendant la culture 2017 (terre noire et terre horticole 1) et trois lors de la culture 2018 (terre maraîchère et terre horticole 2).

En 2017, toutes les modalités fertilisées avaient, dans les deux terres, après 8 et 13 semaines après plantation des valeurs SPAD plus élevées que le contrôle non fertilisé. Lors de la première mesure, la modalité avec un apport important de digestat (Dh3) avait une valeur SPAD supérieure aux autres modalités. Lors de la deuxième mesure, la modalité avec les engrais du commerce avait une valeur SPAD plus élevée que les autres modalités (Fig 12).

En 2018, aucune différence significative n'a pu être observée entre les modalités après 5, 9 et 13 semaines après plantation (Fig 12). Après 13 semaines, les modalités se sont différenciées. Dans la terre horticole 2, les modalités avec la dose normale de digestat avaient les mêmes valeurs que le témoin non fertilisé, alors que la modalité avec la fertilisation du commerce avait une valeur SPAD légèrement supérieure ; la modalité avec la haute dose de digestat avait quant à elle la valeur SPAD la plus élevée (Fig 12). Dans la terre maraîchère, toutes les modalités fertilisées avaient une valeur SPAD plus élevée que le témoin non fertilisé.

En 2018, l'effet de la fertilisation avec le digestat liquide sur la composition chimique des plantes a également été testé. Pour cela un échantillon représentatif de feuilles par variante a été prélevé après 9 semaines de culture. Alors que la teneur en carbone des feuilles ne s'est guère différenciée entre les variantes, la teneur en azote a été relativement fortement influencée surtout dans la terre maraîchère (Tab. 19). La variante avec la haute dose de digestat a montré la dose d'azote la plus élevée, suivie de la variante fertilisée avec les engrais du commerce. De manière générale, les teneurs des feuilles en potasse, magnésium et calcium ont été augmentées suite aux fertilisations. Les teneurs en cadmium, en fer, en sodium, en manganèse, en molybdène et en zinc étaient plus importantes dans les variantes fertilisées (Tab. 20). La teneur en cuivre de toutes les variantes fertilisées était fortement plus importante dans la terre maraîchère (Tab. 20). De telles teneurs en cuivre (supérieures à 100 mg/kg) n'étaient pas observables dans la terre horticole.

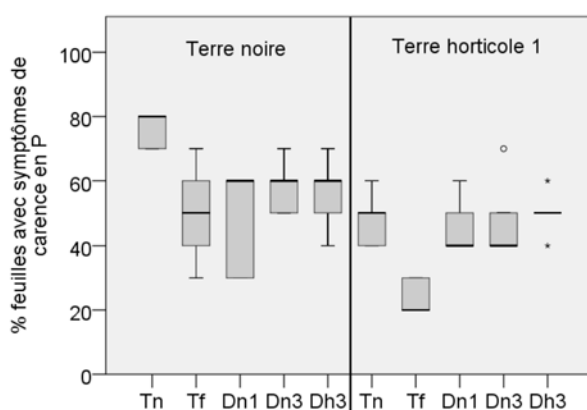


Fig. 11. Influence de la stratégie de fertilisation sur les symptômes de carence des plantes en phosphore 13 semaines après la plantation (le 17 août 2017).

Essai en bacs de 25 litres. Tn : témoin non fertilisé. Tf : témoin fertilisé (170 kg N_{disp}/ha) avec par bac 28,1 g de raclure de corne, - 83,3 g de fumier de poules et 32,2 g de Patentkali® (dose d'azote totale : 170 kg/ha). Dn1 : 1 apport de digestat liquide (170 kg N_{disp}/ha , soit 1,5 l/bac). Dn3: 3 apports de digestat liquide (3 x 57 kg N_{disp}/ha , soit 3 x 0,5 l/bac). Dh3: 3 apports de digestat liquide (3 x 170 kg N_{disp}/ha , soit 3 x 1,5 l/bac). Terre noire et terre horticole 1 : plantation des tomates (variété « Cherry Sweet ») le 15 mai 2017. Chaque boîte à moustache représente les valeurs de cinq répétitions.

Dans toutes les terres, le rendement des modalités non fertilisées étaient significativement plus bas que celle des modalités fertilisées. D'autre part, le rendement global des tomates fertilisées avec la dose élevée de digestat était plus élevé que celle des autres modalités fertilisées (Fig. 13 et Fig. 14). Les différences étaient plus marquées dans les terres horticoles. Les autres modalités fertilisées ne se différençaient dans aucune des terres testées.

Au niveau de la qualité des fruits récoltés, aucune différence notable n'a pu être observée, que cela soit au niveau de leurs teneurs en matière sèche (Fig 15), de leurs teneurs en sucre (Fig. 16) ou de leurs fermetés (Fig. 17). En ce qui concerne l'acidité des fruits, leurs teneurs en acide citrique étaient légèrement supérieures dans les modalités fertilisées, surtout dans la modalité fertilisée avec des engrais du commerce ; ceci en particulier dans la terre noire (Fig. 17).

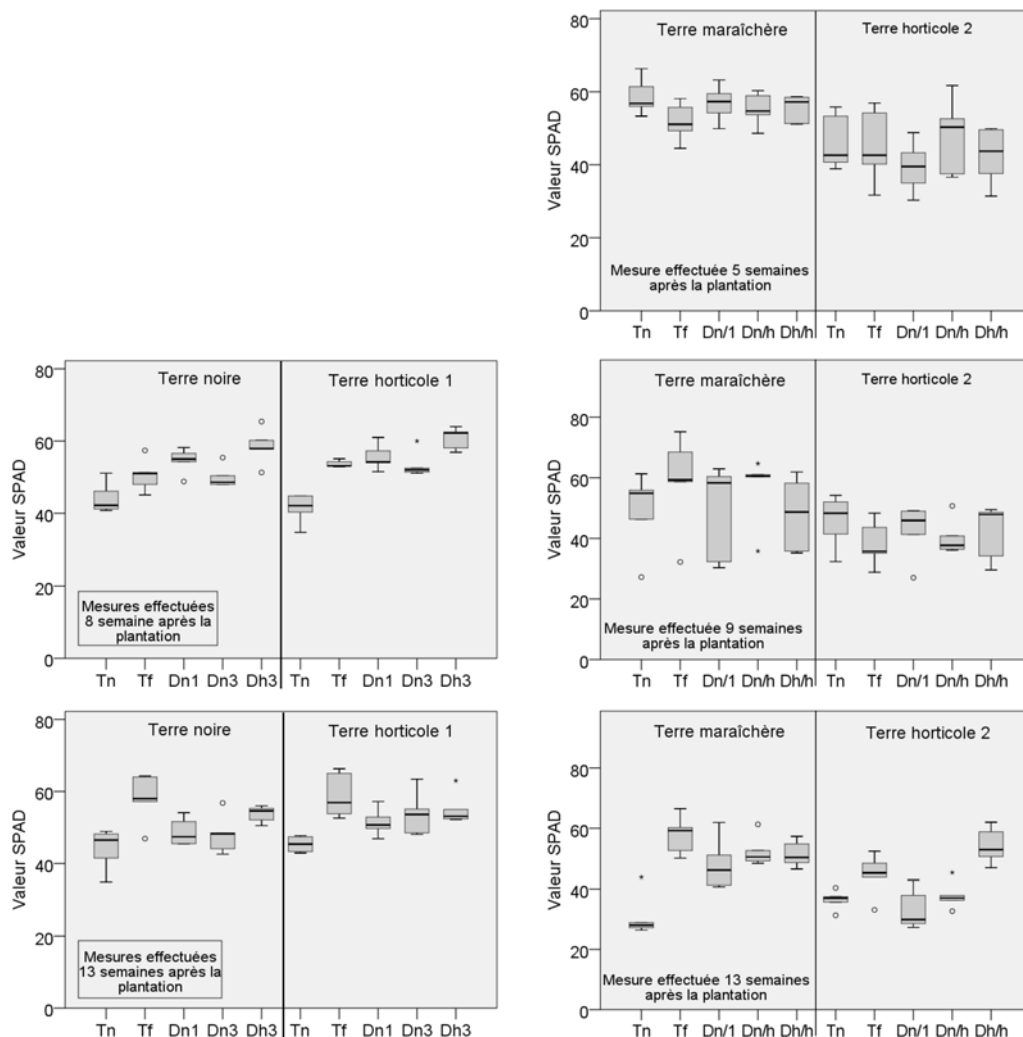


Fig 12. Influence de la stratégie de fertilisation sur la valeur SPAD des feuilles de tomates.

Essai en bac de 25 litres. Tn : témoin non fertilisé. Tf : témoin fertilisé (170 kg N_{disp}/ha) avec par bac 28,1 g de raclure de corne, - 83,3 g de fumier de poules et 32,2 g de Patentkali® (dose d'azote totale : 170 kg/ha). Dn1 : 1 apport de digestat liquide (170 kg N_{disp}/ha, soit 1,5 l/bac). Dn3: 3 apports de digestat liquide (3 x 57 kg N_{disp}/ha, soit 3 x 0,5 l/bac). Dh3: 3 apports de digestat liquide (3 x 170 kg N_{disp}/ha, soit 3 x 1,5 l/bac). Dn/h: 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 21 kg N_{disp}/ha, soit 8 x 0,2 l/bac). Dh/h: 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 64 kg N_{disp}/ha, soit 8 x 0,6 l/bac). Terre noire et terre horticole 1 : plantation des tomates (variété «Cherry Sweet») le 15 mai 2017. Terre maraîchère et terre horticole 2 : plantation des tomates (variété «Favorita») le 10 mai 2018. Chaque boîte à moustache représente les valeurs de cinq répétitions.

Tab. 19. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur des plantes de tomates en éléments nutritifs (partie 1 de 2)

Modalité		Terre maraîchère					Terre horticole 2				
		Tn	Tf	Dn/l	Dn/h	Dh/h	Tn	Tf	Dn/l	Dn/h	Dh/h
N	[g/kg MS]	8.9	21.0	18.1	16.9	24.1	16.8	18.3	13.3	14.0	19.8
C	[g/kg MS]	373.6	361.1	374.4	370.8	365.5	349.1	369.7	373.8	364.0	359.3
C/N		41.9	17.2	20.7	22.0	15.2	20.7	20.2	28.1	26.0	18.2
Matière organique	[% MS]	82.0	74.6	76.5	77.4	75.7	Pas déterminé	78.4	80.4	79.6	78.5
Phosphore P	[mg/g TS]	1.01	1.06	1.13	1.08	1.12		1.12	1.06	1.20	1.20
Potasse K	[mg/g TS]	16.6	34.9	28.9	28.0	28.3		29.4	27.2	22.6	29.5
Magnesium Mg	[mg/g TS]	4.1	10.0	6.2	5.7	6.2		6.3	4.1	4.9	5.0
Calcium	[mg/g TS]	29.2	39.3	49.0	41.0	39.9		32.0	32.2	28.6	36.8

Essai en bacs de 25 litres. Tn : témoin non fertilisé. Tf : témoin fertilisé (170 kg N_{disp}/ha) avec par bac 28,1 g de raclure de corne, - 83,3 g de fumier de poules et 32,2 g de Patentkali® (dose d'azote totale : 170 kg/ha). Dn1 : 1 apport de digestat liquide (170 kg N_{disp}/ha, soit 1,5 l/bac). Dn3: 3 apports de digestat liquide (3 x 57 kg N_{disp}/ha, soit 3 x 0,5 l/bac). Dh3: 3 apports de digestat liquide (3 x 170 kg N_{disp}/ha, soit 3 x 1,5 l/bac). Dn/h: 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 21 kg N_{disp}/ha, soit 8 x 0,2 l/bac). Dh/h: 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 64 kg N_{disp}/ha, soit 8 x 0,6 l/bac). Terre noire et terre horticole 1 : plantation des tomates (variété « Cherry Sweet ») le 15 mai 2017. Terre maraîchère et terre horticole 2 : plantation des tomates (variété « Favorita ») le 10 mai 2018. Fin de l'essai 11 octobre 2018.

Tab. 20. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur des plantes de tomates en éléments nutritifs (partie 2 de 2)

		Terre maraîchère					Terre horticole 2				
Modalité		Tn	Tf	Dn/l	Dn/h	Dh/h	Tn	Tf	Dn/l	Dn/h	Dh/h
Bore B	[mg/g TS]	0.22	0.32	0.32	0.32	0.32	pas déterminé	0.22	0.22	0.32	0.22
Fer Fe	[mg/g TS]	0.32	0.43	0.53	0.42	0.42		0.43	0.42	0.32	0.43
Manganèse Mn	[mg/g TS]	0.22	0.74	0.64	0.53	0.63		1.06	0.53	0.42	0.75
Natrium Na	[mg/g TS]	2.5	6.8	7.7	4.9	9.4		8.7	8.7	6.2	12.2
Soufre S	[mg/g TS]	138.6	134.9	123.2	128.1	111.1		152.3	100.2	80.5	109.5
Zinc Zn	[mg/g TS]	0.11	0.85	0.74	0.63	0.73		0.63	0.43	0.21	0.53
Cadmium Cd	[µg/g TS]	0.20	0.69	0.60	0.51	0.66		0.66	0.43	0.23	0.46
Cobalt Co	[µg/g TS]	0.053	0.067	0.060	0.073	0.072		0.078	0.049	0.073	0.077
Chrome Cr	[µg/g TS]	0.43	0.45	0.48	0.48	0.73		0.45	0.35	0.42	0.45
Cuivre Cu	[µg/g TS]	9.2	108.5	108.3	105.7	107.9		7.2	8.6	6.5	8.3
Molibdène Mo	[µg/g TS]	0.8	2.1	2.6	2.6	2.8		1.6	1.1	1.0	1.9
Nickel Ni	[µg/g TS]	0.57	0.60	0.54	0.61	0.88		0.45	0.39	0.38	0.55
Plomb Pb	[µg/g TS]	0.51	0.58	0.55	0.49	0.48		0.42	0.30	0.37	0.54

Description de l'essai: voir Tab. 19.

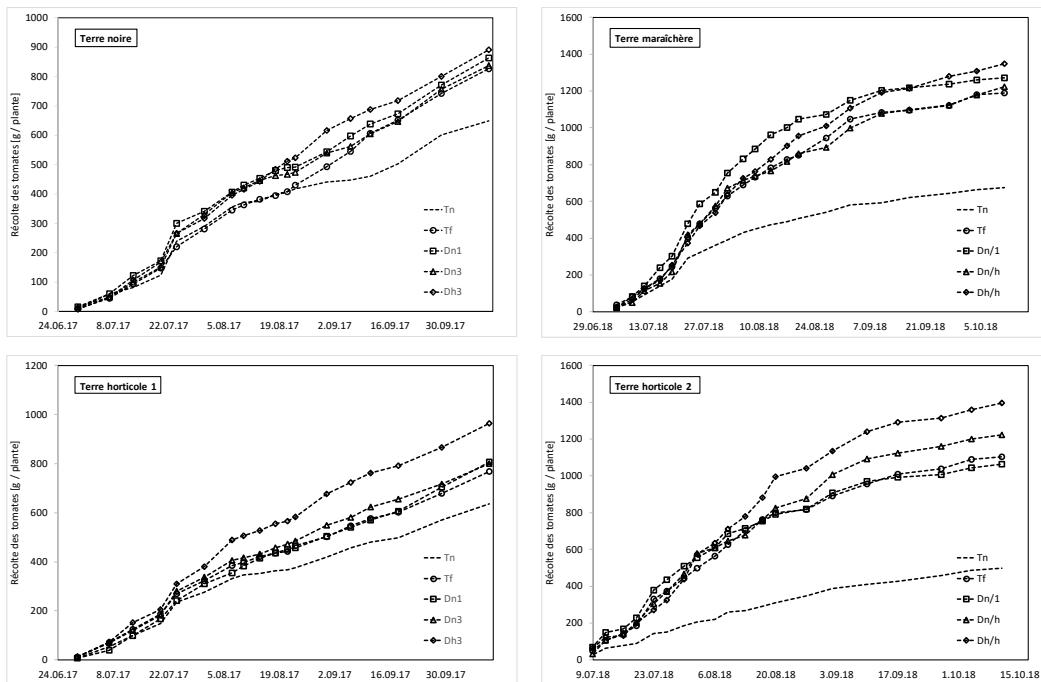


Fig. 13. Influence de la stratégie de fertilisation sur la production de tomates.
Description de l'essai: voir Fig 12. Chaque point représente les valeurs de cinq répétitions.

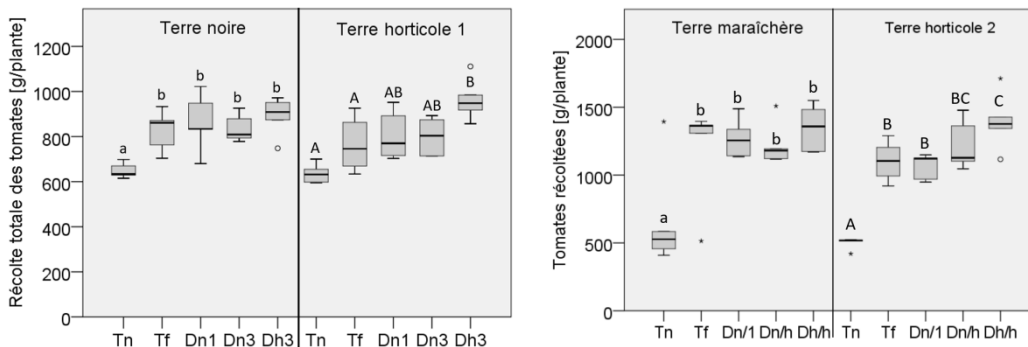


Fig. 14. Influence de la stratégie de fertilisation sur la production de tomates.
Description de l'essai: voir Fig 12. Chaque box représente 5 répétitions. Les modalités d'une terre avec la même lettre ne sont pas significativement différentes selon une analyse de variance suivie d'un test Post Hoc test (Tukey B) à $p < 0,05$. Chaque boîte à moustache représente les valeurs de cinq répétitions.

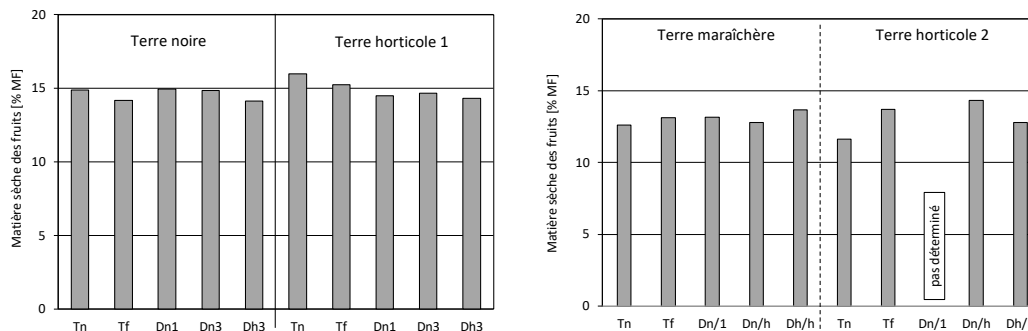


Fig 15. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur en matière sèche des tomates produites.
Description de l'essai: voir Fig 12. Chaque colonne représente les valeurs de cinq répétitions.

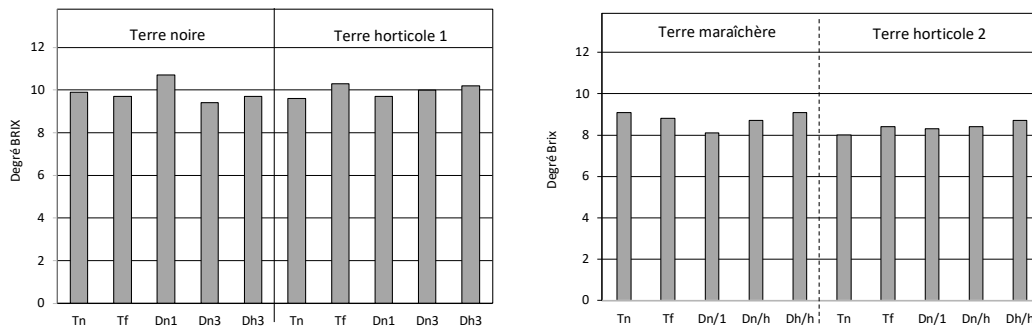


Fig. 16. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur en sucres des tomates produites.

Description de l'essai: voir Fig 12. Chaque colonne représente les valeurs de cinq répétitions.

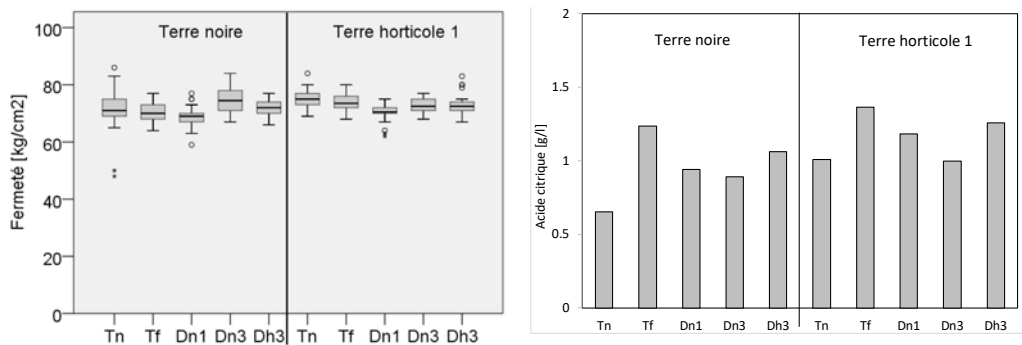


Fig. 17. Influence de la stratégie de fertilisation sur la fermeté et sur l'acidité des tomates produites.

Description de l'essai: voir Fig 12.

Essais tomates en pleine terre

En moyenne, les diamètres mesurés et le stade de floraison ne présentent pas de différence significative entre les modalités (

Tab. 21 et Tab. 22), à l'exception de la valeur sans fertilisation liquide réalisée en 2019. La même constatation peut être faite pour l'élongation totale des plantes (

Tab. 21 et Tab. 22).

La teneur en chlorophylle (analyses SPAD) ne présente aucune différence significative entre les différentes modalités aux différentes dates de mesure (Fig. 18), ni pour la moyenne entre ces dates (

Tab. 21 et Tab. 22).

Les mesures des récoltes montrent un nombre de fruits, ainsi qu'un rendement (kg/m^2) sans différence significative (Tab. 23 et Tab. 24). Par contre, le nombre de fruits et de kg/m^2 avec de la nécrose apicale est plus élevé dans la modalité Digestat 3x (

Tab. 23), mais cela n'affecte pas le rendement de fruits commercialisables (Fig. 22 et Fig. 23, Tab. 23 et Tab. 24).

Les mesures de qualité des fruits corroborent les autres résultats : toutes les modalités sont comparables tant pour le taux de sucre, la fermeté, l'acidité totale et la teneur en matière sèche des fruits (Fig. 24).

La dégustation des tomates réalisée dans le cadre de la journée d'échange d'expériences organisée à Conthey le 7 août 2019, n'a pas montré de différences d'appréciation des

dégustateurs entre les fruits issus de la variante bio et ceux issus des deux modalités digestat (Fig. 19).

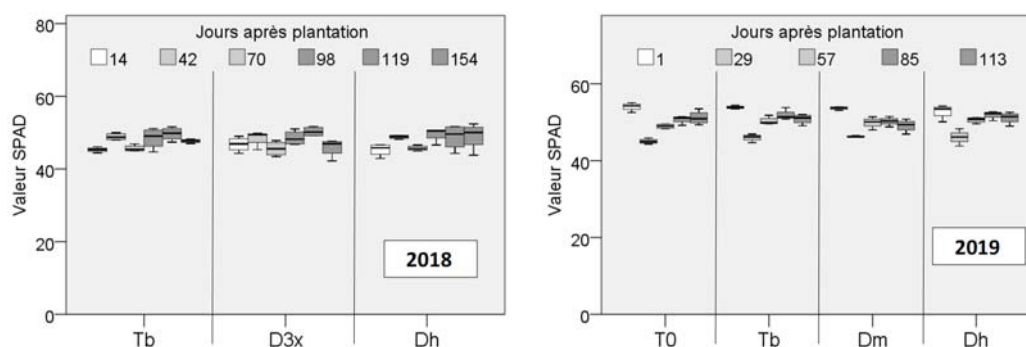


Fig. 18. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur en chlorophylles des feuilles de plantes de tomates.

Essais réalisés en pleine terre dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères.

Essai 2018 : Les tomates de la variété Kanavaro, greffée sur Maxifort, à deux têtes par plant, ont été plantées le 28 mars 2018 à une densité de 2,8 tiges /m². Fin de la culture : 13 septembre 2018. La fertilisation a été réalisée selon les normes de fumure pour un rendement de 13,5 kg/m² (soit en kg/ha 191,3 de N, 90 de P₂O₅, 382,5 de K₂O et 67,5 de Mg). Tb : témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Digestat 3x : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en trois fois durant la culture. Dh : digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.

Essai 2019 : Les tomates de la variété Tomicia, greffée sur Emperador, à deux têtes par plant, ont été plantées le 1^{er} avril 2019 à une densité de 2,8 tiges /m². Fin de la culture : 11 septembre 2019. La fertilisation a été réalisée selon les normes de fumure pour un rendement de 18,0 kg/m² (soit en kg/ha 250 de N, 100 de P₂O₅, 500 de K₂O et 80 de Mg). T0 : témoin avec seulement la fertilisation de fond. Tb : témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Dm : digestat mensuel : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport toutes les quatre semaines. Dh : digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.

Chaque boîte à moustache représente les valeurs de cinq répétitions.

Tab. 21. Observations phénologiques et physiologiques des tomates lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2018¹

Modalité	Diamètre [cm] ²	Stade floraison ²	Elongation totale [cm] ²	Valeur SPAD ³
Fumure bio	9,6	16,4	428,1	47,6
Digestat 3x	9,8	16,7	433,4	47,6
Digestat hebdo	9,5	16,3	424,5	47,9

¹ Essai réalisé en pleine terre dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères. Les tomates de la variété Kanavaro, greffée sur Maxifort, à deux têtes par plant, ont été plantées le 28 mars 2018 à une densité de 2,8 tiges /m². Fin de la culture : 13 septembre 2018. La fertilisation a été réalisée selon les normes de fumure pour un rendement de 13,5 kg/m² (soit en kg/ha 191,3 de N, 90 de P₂O₅, 382,5 de K₂O et 67,5 de Mg). Témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Digestat 3x : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en trois fois durant la culture. Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.

²Moyennes sur quatre répétitions. Aucune différence significative entre les valeurs.

Tab. 22. Observations phénologiques et physiologiques des tomates lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2019¹

Modalité	Diamètre [cm] ²	Stade floraison ²	Elongation totale [cm] ²	Valeur SPAD ³
Témoin sans fumure liquide	7,6*	14,5*	395,2*	50,1
Témoin bio	8,5	15,1	452,3	50,5
Digestat mensuel	8,7	15,2	450,3	49,9
Digestat hebdo	8,5	14,9	439,8	50,8

¹ Essai réalisé en pleine terre dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères. Les tomates de la variété Tomicia, greffée sur Emperador, à deux têtes par plant, ont été plantées le 1^{er} avril 2019 à une densité de 2,8 tiges /m². Fin de la culture : 11 septembre 2019. La fertilisation a été réalisée selon les normes de fumure pour un rendement de 18,0 kg/m² (soit en kg/ha 250 de N, 100 de P₂O₅, 500 de K₂O et 80 de Mg). Témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Digestat mensuel : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport toutes les quatre semaines. Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.

²Moyennes sur quatre répétitions. Aucune différence significative entre les valeurs.

³Moyenne de cinq notations (moyenne sur quatre répétitions). Aucune différence significative entre les valeurs, à l'exception des valeurs de la variante « Témoin sans fumure liquide » marquées d'une * et qui se différencient significativement des autres valeurs.

Le profil racinaire a été effectué sur la deuxième plante utilisée pour les mesures de phénologie de chaque parcelle élémentaire. Le volume analysé était de 50cm x 50cm x 30cm (longueur, largeur, profondeur), ce qui correspond à une zone contenant l'entier du système racinaire. L'abondance racinaire a été évaluée sur une échelle de 1 (faible) à 5 (forte) pour les racines dont le diamètre n'excédait pas les 5mm (0-2mm et 2-5mm). Pour les racines ayant un diamètre supérieur à 5mm, un comptage réel a été effectué. L'analyse des profils de culture réalisée à la fin de l'essai 2018 a permis d'observer des racines saines pour toutes les modalités. Le niveau principal d'enracinement se situe toujours dans le premier horizon (0 à 10 cm), surtout dans le cube de plantation. L'abondance des racines dans cet horizon est, en moyenne, supérieure pour les modalités avec digestat, en particulier pour les racines dont le diamètre est supérieur à 5mm (Tab. 25). Le digestat n'a pas influencé l'état sanitaire des racines.

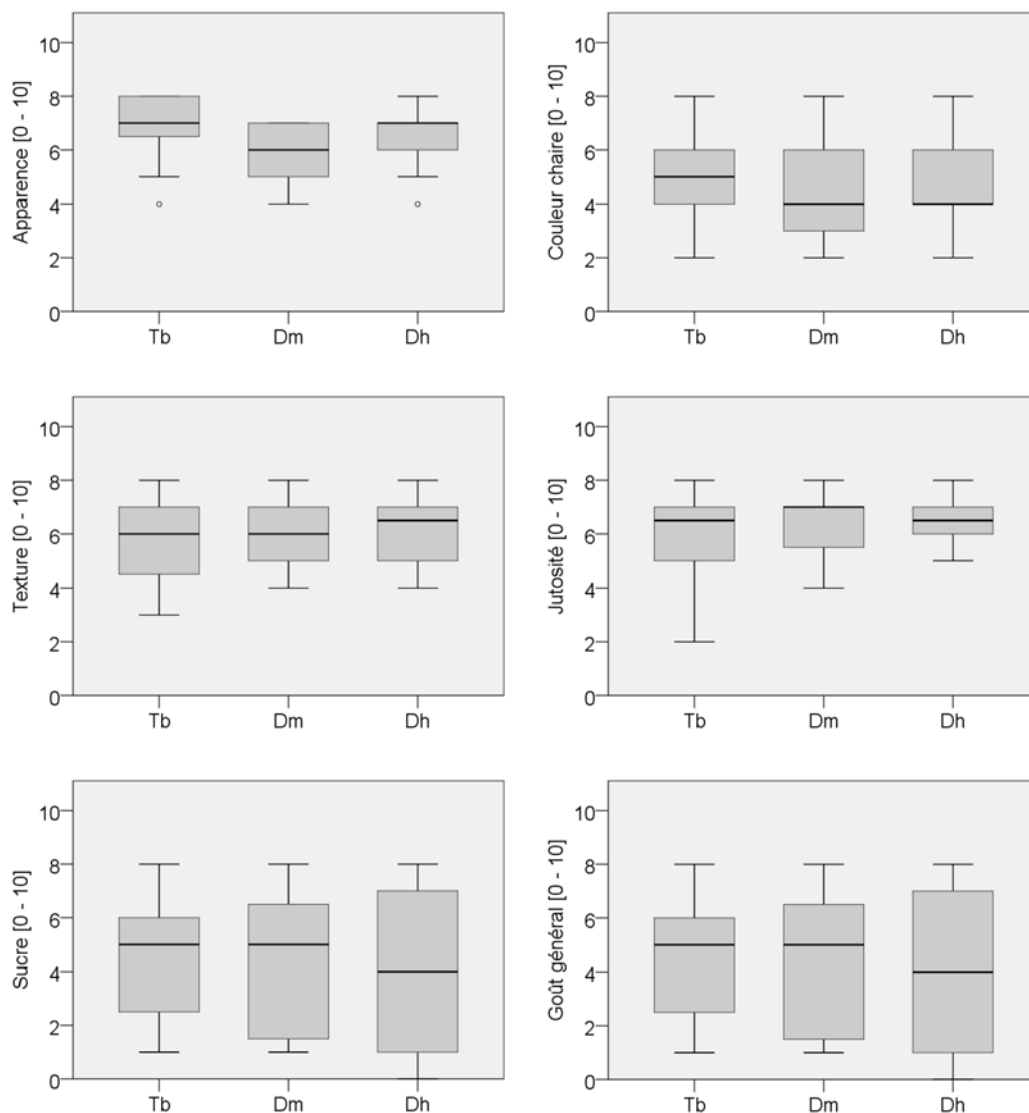


Fig. 19. Influence de la stratégie de fertilisation sur la qualité gustative des tomates lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai : voir Fig. 18. L'évaluation des qualités gustatives des tomates a été réalisée par 12 participants à la journée d'échange d'expériences organisée à Conthey le 7 août 2019.

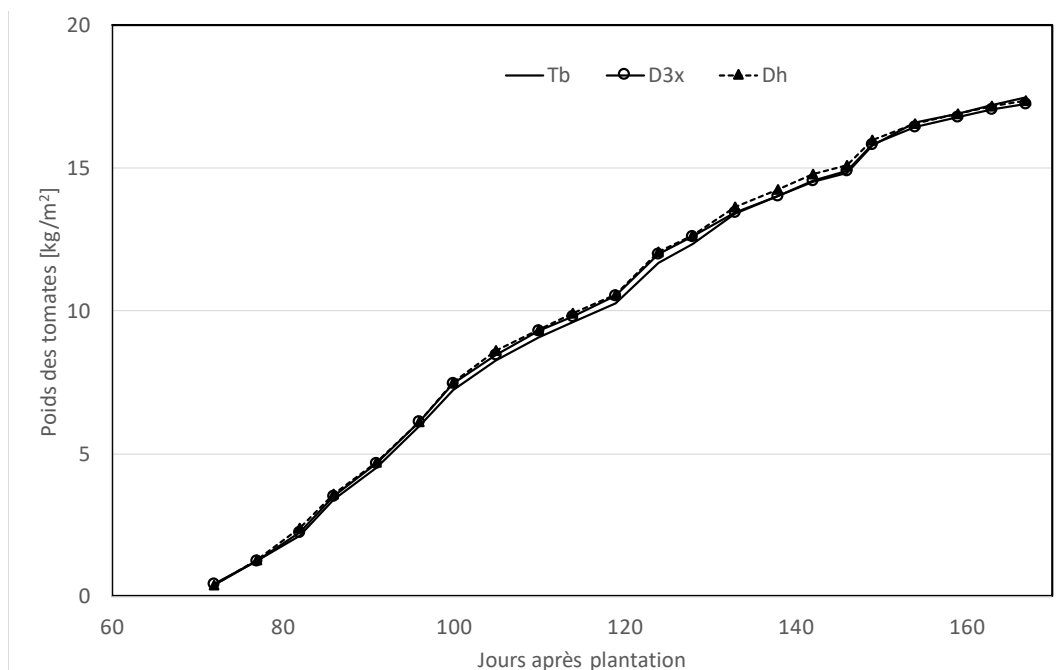


Fig. 20. Influence de la stratégie de fertilisation sur la récolte en tomates lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2018.

Description de l'essai : voir Fig. 18

Tb : Témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce.
 D3x : Digestat 3x : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en trois fois durant la culture.
 Dh : Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.
 Chaque point correspond à la moyenne de quatre répétitions

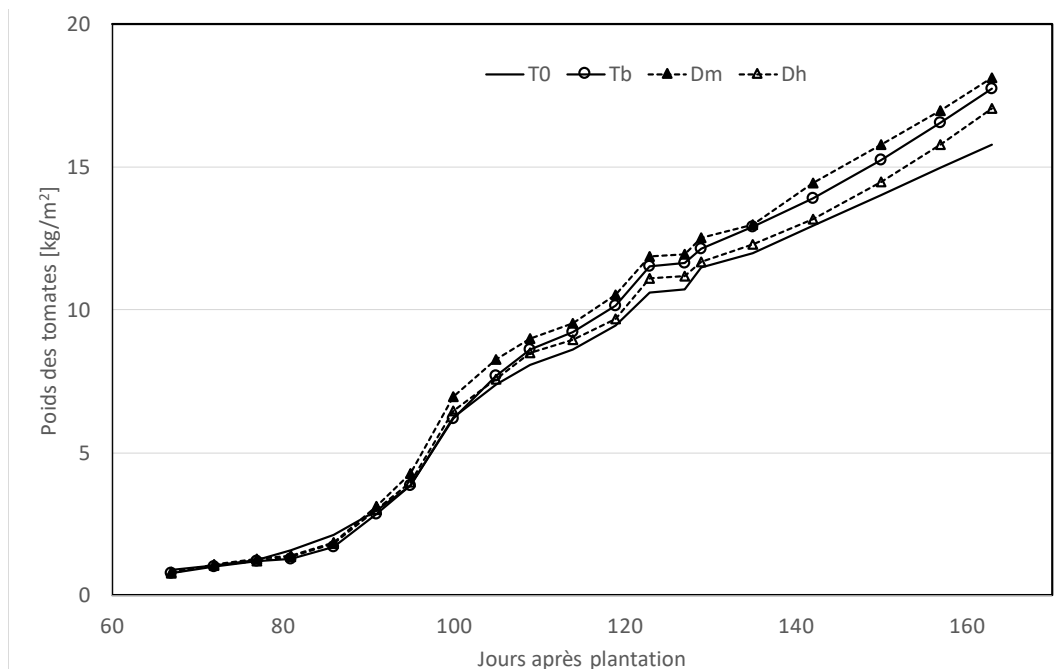


Fig. 21. Influence de la stratégie de fertilisation sur la récolte en tomates lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai : voir Fig. 18

T0 : témoin avec seulement la fertilisation de fond. Tb : témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce.
 Dm : digestat mensuel : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport toutes les quatre semaines.
 Dh : digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.
 Chaque point correspond à la moyenne de quatre répétitions

Tab. 23. Influence de la stratégie de fertilisation sur la récolte cumulée en tomates non commercialisables (déchets) lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2018¹

Modalité	Poids cumulé des tomates non commercialisable [kg/m ²]	Poids cumulé des tomates avec symptôme « cul noir » [kg/m ²]
Fumure bio	2,2 A	0,2 a
Digestat 3x	2,1 A	0,6 b
Digestat hebdo	1,7 B	0,3 a

¹ Essai réalisé en pleine terre dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères. Les tomates de la variété Kanavaro, greffée sur Maxifort, à deux têtes par plant, ont été plantées le 28 mars 2018 à une densité de 2,8 tiges /m². Fin de la culture : 13 septembre 2018. La fertilisation a été réalisée selon les normes de fumure pour un rendement de 13,5 kg/m² (soit en kg/ha 191,3 de N, 90 de P₂O₅, 382,5 de K₂O et 67,5 de Mg). Témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Digestat 3x : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en trois fois durant la culture. Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire. Moyennes sur quatre répétitions. Les modalités avec la même lettre ne sont pas significativement différentes (test de Dunn, P<0.05).

Tab. 24. Influence de la stratégie de fertilisation sur la récolte cumulée en tomates non commercialisables (déchets) lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2019¹

Modalité	Poids cumulé des tomates non commercialisable [kg/m ²]	Poids cumulé des tomates avec symptôme « cul noir » [kg/m ²]
Témoin sans fumure liquide	2,9 A	0,64 b
Témoin bio	3,3 A	0,04 a
Digestat mensuel	3,3 A	0,03 a
Digestat hebdo	3,1 A	0,04 a

¹ Description de l'essai :

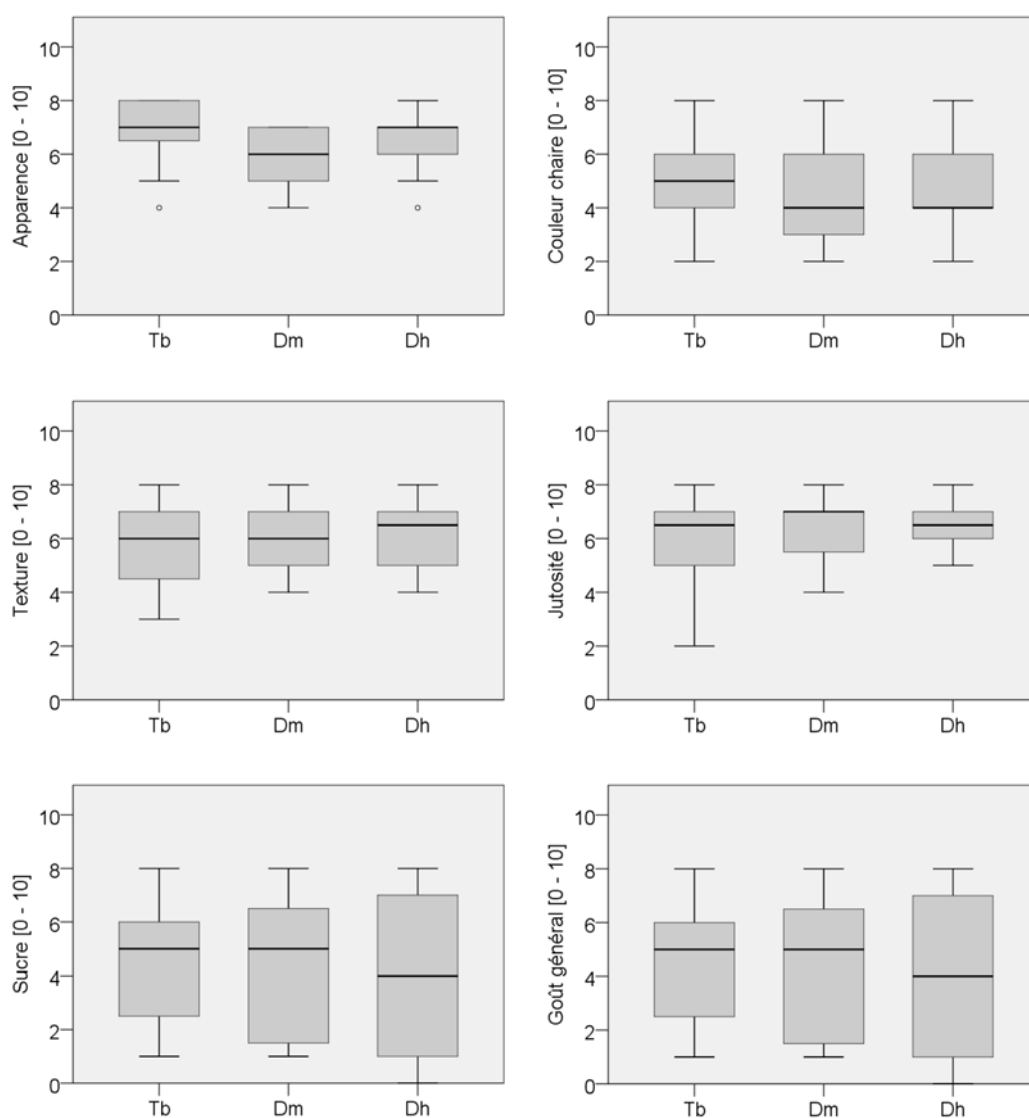


Fig. 19. Influence de la stratégie de fertilisation sur la qualité gustative des tomates lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai : voir Fig. 18. L'évaluation des qualités gustatives des tomates a été réalisée par 12 participants à la journée d'échange d'expériences organisée à Conthey le 7 août 2019.

. Témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce.
 Digestat mensuel : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport toutes les quatre semaines.
 Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.

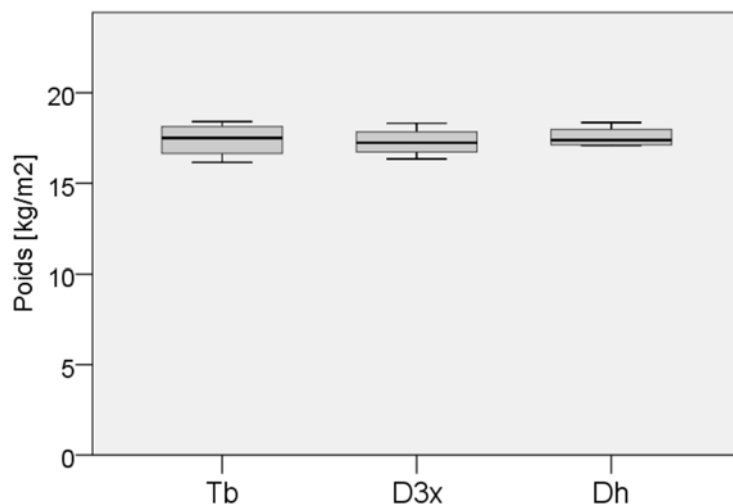


Fig. 22. Influence de la stratégie de fertilisation sur la récolte cumulée en tomates commercialisables lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2018.

Description de l'essai : voir Fig. 18. Chaque boîte à moustaches correspond à quatre répétitions.
 Tb : Témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce.
 D3x : Digestat 3x : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en trois fois durant la culture.
 Dh : Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.
 Chaque boîte à moustache représente les valeurs de cinq répétitions.

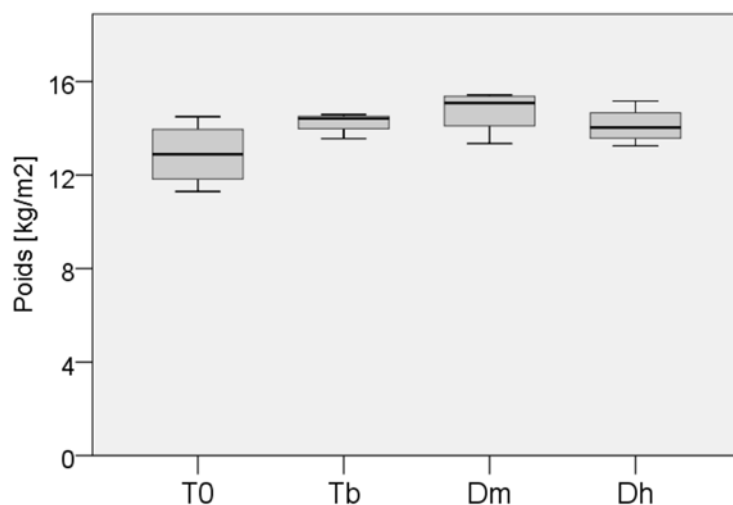


Fig. 23. Influence de la stratégie de fertilisation sur la récolte cumulée en tomates commercialisables lors de l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai : voir Fig. 18. Chaque boîte à moustaches correspond à quatre répétitions.
 Tb : Témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce.
 D3x : Digestat 3x : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en trois fois durant la culture.
 Dh : Digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.
 Chaque boîte à moustache représente les valeurs de cinq répétitions.

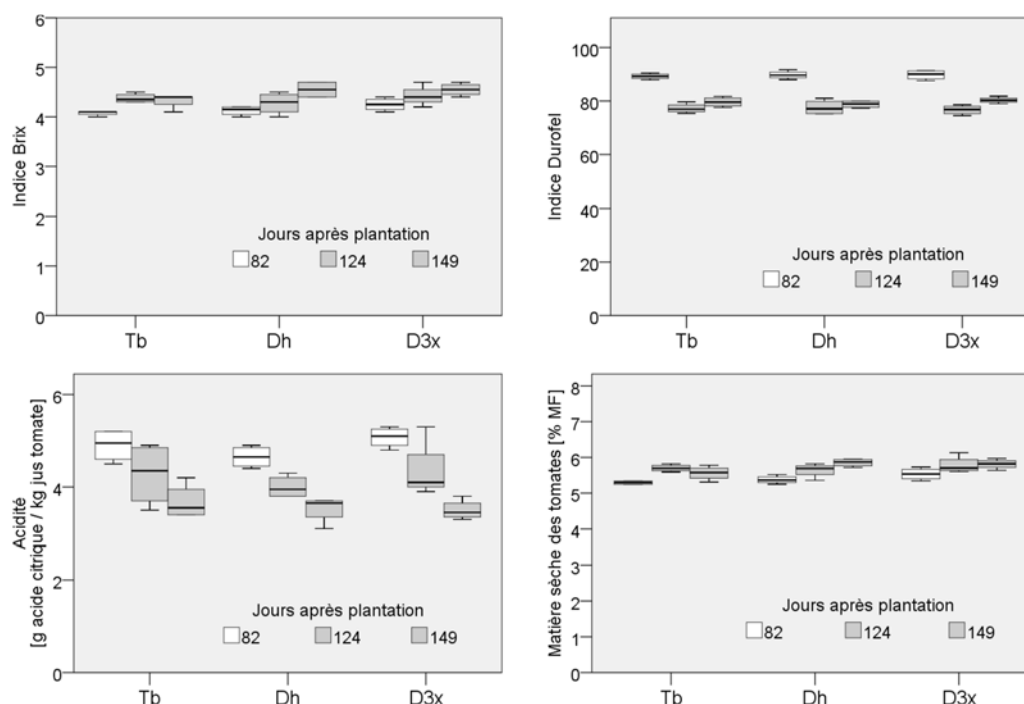


Fig. 24. Influence de la stratégie de fertilisation sur la qualité des tomates dans l'essai en pleine terre réalisé à Agroscope-les Fougères en 2018.

Description de l'essai : voir Fig. 18. Chaque boîte à moustaches correspond à quatre répétitions. Aucune différence significative entre les valeurs.

Tab. 25. Influence de la stratégie de fertilisation sur l'abondance des racines dans l'horizon A (0 à 10 cm) lors de l'essai tomates en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2018^{1,3}.

Modalité	Abondance des racines avec un diamètre de 0-2 mm ²	Abondance des racines avec un diamètre de 2-5 mm ²	Abondance des racines avec un diamètre de > 5 mm ²
Fumure bio	1,5	1,5	3,5
Digestat 3x	1,8	1,8	6,0
Digestat hebdo	1,3	1,8	7,0

¹Description de l'essai : voir

Tab. 23.

²Notation de l'abondance des racines : évaluation sur une échelle de 1 (faible) à 5 (forte) pour les racines dont le diamètre n'excédait pas les 5mm (0-2mm et 2-5mm). Pour les racines ayant un diamètre supérieur à 5mm, un comptage réel a été effectué.

³Moyennes sur quatre répétitions. Pas de différences significatives entre les valeurs.

Essais de culture de mâche après tomates

Peu de différence de rendements ont été observées dans la culture de mâche mise en place sur les parcelles de tomates immédiatement à la fin de l'essai tomates. Toutefois, la variante sans fertilisation liquide pendant la culture de tomate avait tendanciellement un rendement légèrement plus faible que les autres procédés. Les parcelles ayant reçu du digestat liquide avaient un rendement légèrement supérieur au témoin avec engrais du commerce, avec un meilleur résultat pour le procédé avec un apport hebdomadaire de digestat en comparaison du digestat liquide apporté toutes les quatre semaines.

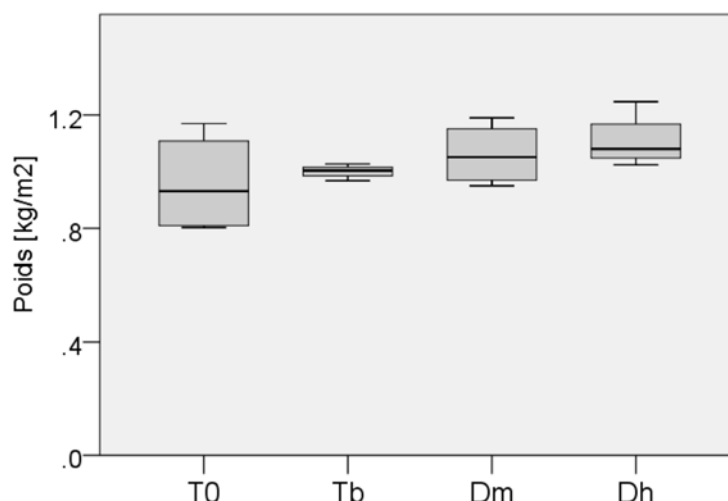


Fig. 25. Influence de la stratégie de fertilisation d'une culture de tomates en pleine terre réalisé à Agroscope-Les Fougères sur la production de mâche semée directement à la fin de l'essai tomates 2019.

Description de l'essai tomates : voir Fig. 18. La mâche a été semée le 3 octobre 2019 sur les parcelles de l'essai tomates et n'ont reçu aucune fertilisation supplémentaire. La récolte des plantes a été effectuée le 5 novembre 2019. T0 : Témoin avec seulement fumure de fond (50%). Tb : To : Témoin avec seulement fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais liquide bio du commerce (Biorga NK). Dm: fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en toutes les quatre semaines. Dh: fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire. Chaque boîte à moustaches correspond à quatre répétitions.

Essais salades en pleine terre

Dans les essais 1 et 3, le poids des salades était identique dans les trois variantes avec fertilisation liquide (digestat ou Biorga NK) (Fig. 26). Dans le deuxième essai, le poids des salades était supérieur dans les variantes fertilisées avec le digestat liquide, principalement dans la variante avec le fractionnement des apports de digestat (Fig. 26).

Lors de tous les essais, la teneur en matière sèche des salades était identique dans toutes les variantes avec fertilisation liquide, et légèrement inférieure à la variante sans fertilisation liquide (Fig. 26).

La teneur en nitrate des salades était identique dans toutes les variantes avec fertilisation liquide, et légèrement inférieure à la variante sans fertilisation liquide (Fig. 27).

3.3 Effet des stratégies d'apport de digestat liquide sur lessivage de l'azote

Lors des essais en bacs, l'influence des stratégies de fertilisation sur le lessivage de l'azote minéral a été mesurée, la quantité d'eau en surplus s'écoulant des bacs ayant été quantifiée, ainsi que sa teneur en ammonium et en nitrate.

De manière générale, la quantité d'azote lessivée par rapport à la quantité d'azote fertilisée a été très faible dans les quatre terres (Fig. 28). Le lessivage cumulé le plus important a été observé dans la terre horticole 1 ; il y était compris entre 0,7 et 2,2 % de l'azote apporté lors de la fertilisation. Dans la terre noire, cette valeur était inférieure à 0,5%, et dans la terre maraîchère et la terre horticole 2 inférieure à 0,2 % (Fig. 28).

La modalité digestat à haute dose a eu dans toutes les terres le lessivage d'azote le plus important (Fig. 28 et Fig. 29). Toutefois, les quantités mesurées étaient globalement extrêmement faibles.

Il est à noter qu'à partir de fin juin en 2017 (terre noire et terre horticole 1) et de fin juillet en 2018 (terre maraîchère et terre horticole 2) pratiquement plus de lessivage d'azote minéral n'a été observé, les plantes de tomates assimilant au fur et à mesure l'azote disponible (Fig. 28).

En ce qui concerne la très faible quantité d'azote lessivé dans les modalités avec les quantités élevées de digestat liquide, il faut noter que le digestat a formé une croûte à la surface de la terre, et de ce fait a été peu lessivé. Par contre, les pertes ammoniacales pourraient être relativement importantes. Les résultats des essais pour caractériser ce point sont présentés ci-dessous.

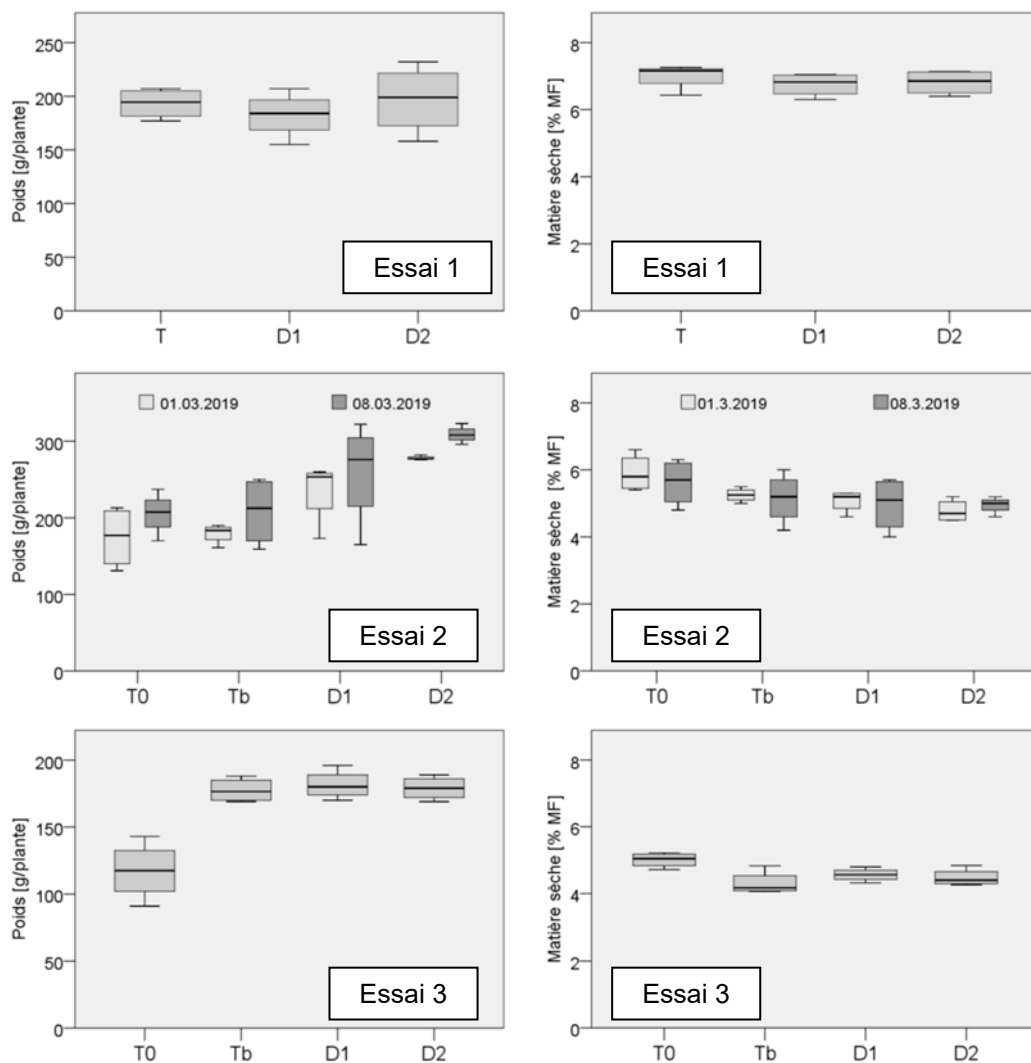


Fig. 26. Influence de la stratégie de fertilisation sur le poids et la teneur en matière sèche des salades dans des cultures en pleine terre^{1,2}

¹Essai réalisé en pleine terre dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères. Plantation des salades (densité de 16 plantes /m²) : essai 1 : 27.11.2017, essai 2 : 28.11.2018, essai 3 : 19.12.2019. Récolte: essai 1 : 7.3.2018, essai 2 : 1 et 8.3.2019, essai 3 : 5.2.2019. La fertilisation a été réalisée selon les normes de fumure. T0 : fumure de fond. Tb : fumure de fond et fertilisation avec engrais liquide bio du commerce (Biorga NK) apporté juste avant la plantation. D1: fumure de fond et digestat liquide apporté juste avant la plantation. D2: fumure de fond et digestat liquide apporté en deux fois (juste avant la plantation et environ quatre semaines après).

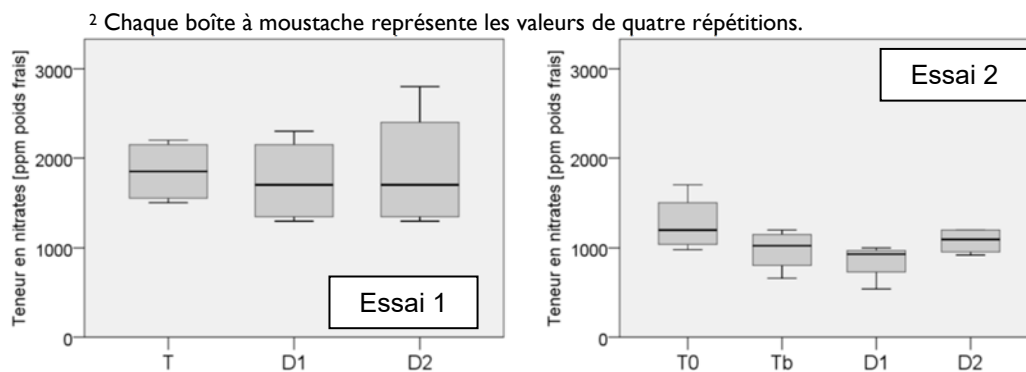


Fig. 27. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur en nitrate des salades dans des cultures en pleine terre^{1,2}

¹Description de l'essai : voir Fig. 26.

²Chaque boîte à moustache représente les valeurs de quatre répétitions.

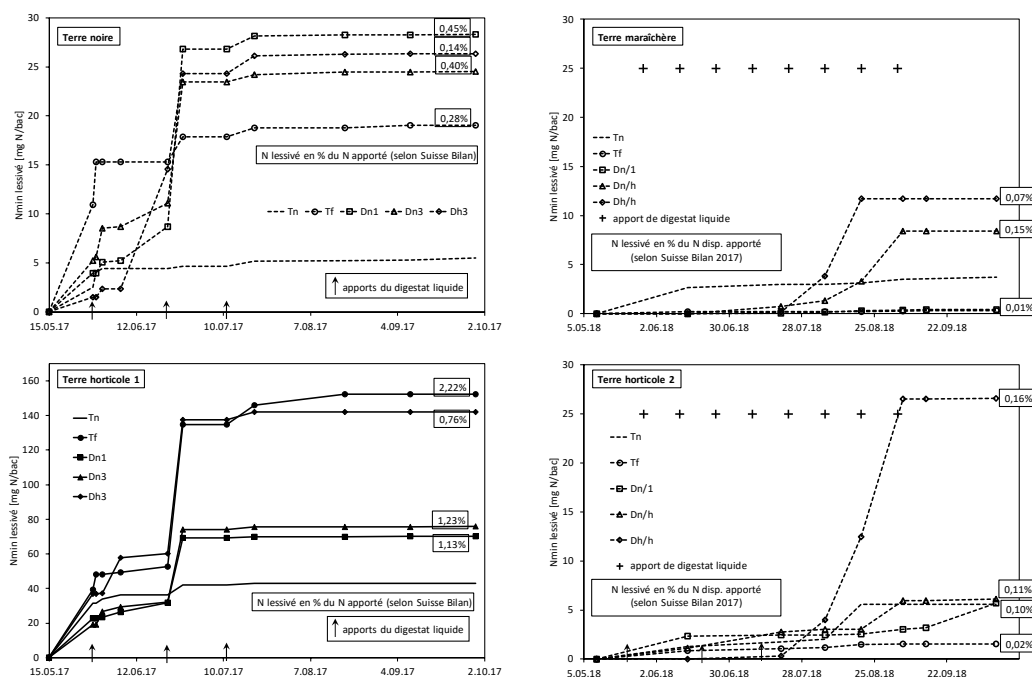


Fig. 28. Influence de la stratégie de fertilisation sur le lessivage cumulé de l'azote dans une culture de tomate.

Essai en bacs de 25 litres. Tn : témoin non fertilisé. Tf : témoin fertilisé (170 kg N_{disp}/ha) avec par bac 28,1 g de raclure de corne, - 83,3 g de fumier de poules et 32,2 g de Patentkali® (dose d'azote totale : 170 kg/ha). Dn1 : 1 apport de digestat liquide (170 kg N_{disp}/ha, soit 1,5 l/bac). Dn3: 3 apports de digestat liquide (3 x 57 kg N_{disp}/ha, soit 3 x 0,5 l/bac). Dh3: 3 apports de digestat liquide (3 x 170 kg N_{disp}/ha, soit 3 x 1,5 l/bac). Dn/h: 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 21 kg N_{disp}/ha, soit 8 x 0,2 l/bac). Dh/h: 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 64 kg N_{disp}/ha, soit 8 x 0,6 l/bac). Terre noire et terre horticole 1 : plantation des tomates (variété «Cherry Sweet») le 15 mai 2017. Terre maraîchère et terre horticole 2 : plantation des tomates (variété «Favorita») le 10 mai 2018. Chaque point représente les valeurs de cinq répétitions.

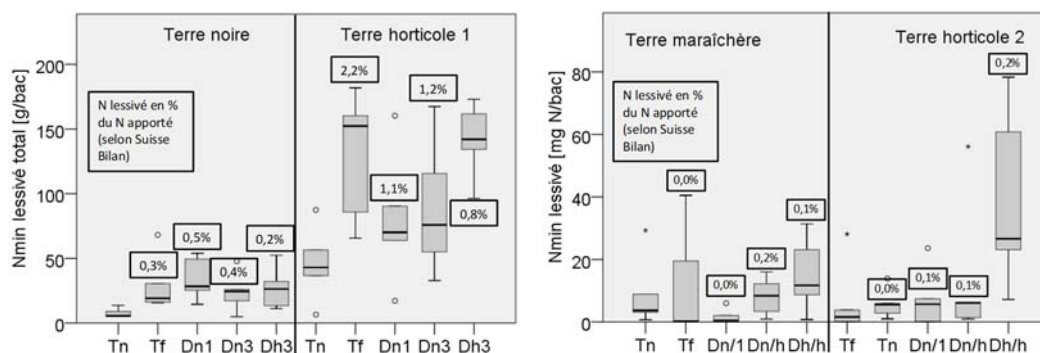


Fig. 29. Influence de la stratégie de fertilisation sur le lessivage total de l'azote pendant une culture de tomate.

Description de l'essai: voir Fig. 28. Chaque boîte à moustache représente les valeurs de cinq répétitions.

3.4 Effet des stratégies d'apport de digestat liquide sur les pertes ammoniacales

Plus la quantité d'azote ajouté au sol, plus la quantité d'azote ammoniacal volatilisé est importante (Fig. 30 et Fig. 31). Ceci est en soi à attendre. Il est particulièrement intéressant de remarquer que la quantité d'azote ammoniacal volatilisé est très différente entre les deux sols testé : dans la terre maraîchère, pratiquement le double d'ammoniac volatilisé est observé en comparaison à ce qui se passe dans la terre horticole 2 (Fig. 30 et Fig. 31). La majorité de la volatilisation est observé dans les premiers trois jours dans la terre maraîchère et dans les premiers 7 jours dans la terre horticole 2 (Fig. 30).

Les divers engrais testés (engrais bio du commerce, urée ou digestat liquide) montrent, en considérant les quantités d'azote apportées, peu de différence. Lorsque l'on évalue la quantité d'azote ammoniacal volatilisé par rapport à la quantité totale d'azote fertilisé, des différences notables entre les terres et entre les modalités sont à observer. Dans la terre horticole 2, la volatilisation de l'azote ammoniacal se situe entre 15 à 20% de l'azote total pour le témoin bio et pour toutes les modalités de digestat liquide, indépendamment de la quantité de digestat utilisée (Fig. 31). Dans cette terre, l'urée a, avec environ 25% de l'azote fertilisé, le pourcentage de volatilisation le plus important. Dans la terre maraîchère, un effet dose est nettement observable : alors que moins de 15% de l'azote total se volatilise avec la dose inférieure de digestat liquide, plus de 35% de l'azote se volatilise avec les deux doses les plus importantes testées (Fig. 31). Ainsi, pour qu'au maximum 20% de l'azote fertilisé ne se volatilise, ce qui correspond au niveau de témoin bio, un maximum de 240 mg d'azote fertilisé par sol de terre ne devrait pas être dépassé par donnée. Cela correspond à environ 90kg d'azote total par ha.

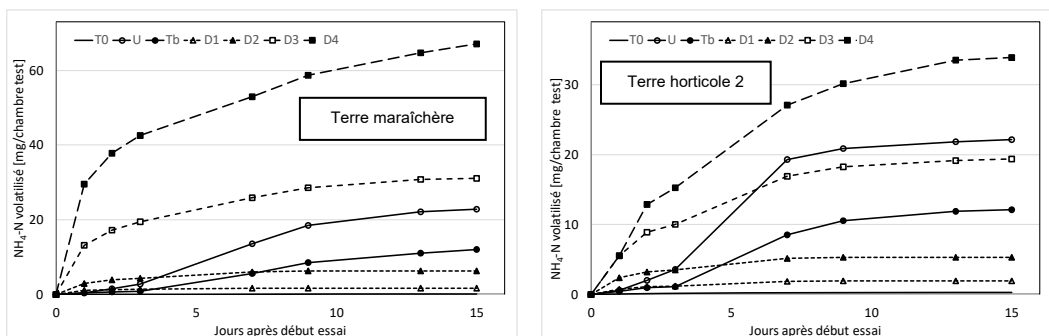


Fig. 30. Influence de la quantité de digestat liquide apportée lors d'un apport sur l'évolution de la volatilisation de l'azote ammoniacal.

Les pertes d'azote ammoniacal par volatilisation ont été mesurées au moyen d'un système clos à flux dynamique. 150g de sol sont placés dans des bouteilles de 500 ml (chambre test), après humidification des sols et application des produits, ces bouteilles sont branchées au dispositif de volatilisation et placées à 20°C pendant 15 jours. En sortie de ces chambres de volatilisation, l'air chargé en NH₃ est acheminé dans un tube contenant de l'acide sulfurique fixant l'ammoniac.

T0 : terre non fertilisée. U : terre fertilisée avec de l'urée (1'117 mg/l, soit 667 mg de N_{tot}). Tb : terre avec engrais bio du commerce, soit par litre 2,34 g de raclure de corne, 6,94 g de fumier de poulet et 2,68g de Patentkali® ; correspond à 472 mg de N_{tot}). D1 à D4 : divers doses d'apport de digestat liquide, soit par litre de terre 15,3 ml, 44,0 ml, 117,3 ml et 235,3 ml. Le digestat liquide utilisé pour la terre maraîchère contenait 0,53% d'azote total (donc apport de N_{tot} par litre de terre : 80, 236, 628 et 1255 mg), celui pour la terre horticole 2 en contenait 0,51% (donc apport de N_{tot} par litre de terre : 77, 229, 608 et 1216 mg). Chaque valeur est la moyenne de 5 répétitions (à l'exception de la variante D4 : 2 répétitions).

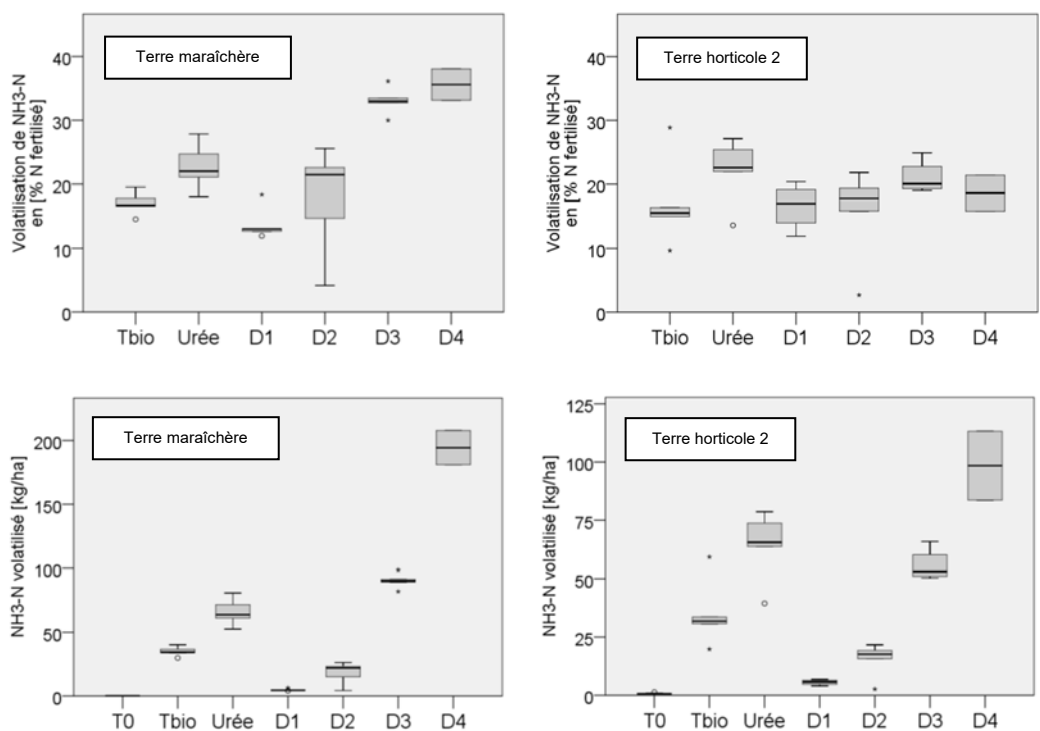


Fig. 31. Influence de la quantité de digestat liquide apportée lors d'un apport sur la volatilisation cumulée de l'azote ammoniacal.

Description de l'essai : voir Fig. 30.

Valeur cumulées de l'azote ammoniacal volatilisé pendant 15 jours. Chaque boîte à moustache représente les valeurs de cinq répétitions (à l'exception de la variante D4 : 2 répétitions).

3.5 Effets de la fertilisation des sols sur leurs caractéristiques physiques

Ces influences ont été étudiées à trois niveaux : en essai en condition contrôlée sans plantes, ainsi que dans les essais en bacs, puis dans les essais en pleine terre. Dans les essais en conditions contrôlées, différentes quantités de digestat liquide a été données dans deux terres, puis les caractéristiques physiques de ces sols après une période d'incubation d'environ deux semaines ont été analysées. Dans les essais en bacs et en pleine terre, les caractéristiques des sols prélevés dans les différentes modalités à la fin des essais ont été analysées.

Capacité de rétention en eau du sol.

En conditions contrôlées et sans plantes, la capacité de rétention en eau dans les deux terres testées a été légèrement réduite par la fertilisation avec les engrais organiques du commerce et les doses faibles et moyennes de digestat liquide (Fig. 32). Par contre, la haute dose de digestat liquide a augmenté la capacité de rétention en eau des sols, en particulier dans la terre horticole (Fig. 32).

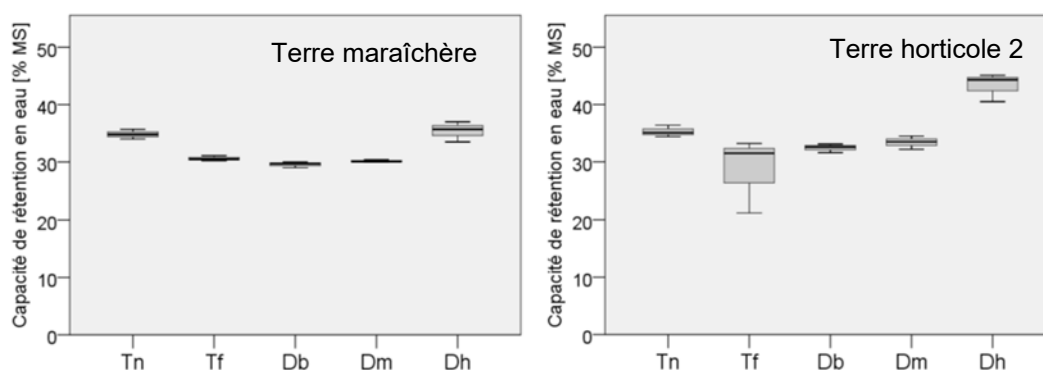


Fig. 32. Influence d'apport de fertilisants organiques sur la capacité de rétention en eau de deux sols.

Terre maraîchère : une terre provenant d'un sol de l'entreprise maraîchère Höneisen, Tännlihof, à Andelfingen (ZH). Terre horticole : Leureko AG (Laufenburg-AG).

Tn : témoin non fertilisé ; Tf : témoin fertilisé (1,17 g raclures de corne, 3,47 g fumier de poules et 1,34 g Patentkali) ; Db : digestat liquide basse dose (58.6 g / litre de sol, correspond à Tf) ; Dm : digestat liquide dose moyenne (117,2 g / litre de sol) ; Dh : digestat liquide dose haute (175,8 g / litre de sol).

Chaque box représente 3 répétitions.

A la fin des essais en bacs, aucune influence des diverses stratégie de fertilisation sur la capacité de rétention en eau des sols n'a été observée, et ceci dans les quatre terres testés (Fig. 33). La sur-fertilisation avec le digestat liquide (modalité Dh3) n'a, dans les deux terres testées et dans la durée de l'essai, pas eu d'effet négatif sur ce point.

Dans l'essai en pleine terre réalisé en 2019, la variante n'ayant reçu que l'engrais de fond avait, à la fin de l'essai, une capacité de rétention en eau légèrement inférieurs aux autres trois variantes (Fig. 34). Aucune différence n'a été observée entre les modalités avec des apports de Biorga ou de digestat liquide pendant la culture (Fig. 34).

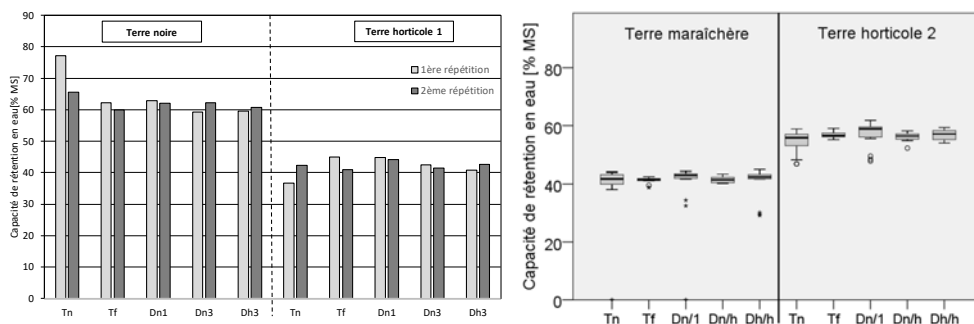


Fig. 33. Influence de la stratégie de fertilisation sur la capacité de rétention en eau du sol lors des essais en bacs.

Description de l'essai: voir Fig. 28. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais. Terre noire et terre horticole 1 : réalisation de deux analyses avec des échantillons mélangés provenant des cinq bacs d'une modalité. Terre maraîchère et terre horticole 2 : chaque box correspond à l'analyse de 15 échantillons de sols (3 provenant de chacun des 5 bacs d'une modalité).

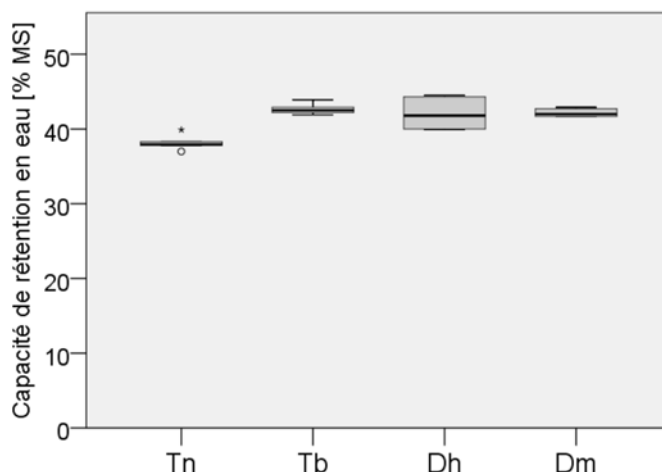


Fig. 34. Influence de la stratégie de fertilisation sur la capacité de rétention en eau du sol lors de l'essai en pleine terre réalisé dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai: voir Fig. 18. Tn : témoin fertilisé seulement avec fumure de fond ; Tb : témoin avec fumure de fond et apport de Biorga pendant la culture. Dh : modalité avec fumure de fond puis apport hebdomadaire de digestat liquide. Dm : modalité avec fumure de fond puis apport mensuel de digestat liquide. Prélèvement des échantillons de sol réalisés à la fin de l'essai. Chaque box correspond à l'analyse de 6 échantillons de sols.

Stabilité des agrégats du sol.

Dans les essais sans plantes, l'apport de digestat liquide a augmenté la stabilité des agrégats dans les deux sols testés (Fig. 35), et ceci principalement avec les doses faible et moyenne de digestat apporté. Avec la haute dose de digestat, la stabilité des agrégats redescendait (Fig. 35). L'apport d'engrais du commerce n'a pas influencé la stabilité des agrégats dans le sol maraîcher, mais l'a augmenté dans la terre horticole 2 ; cet effet était toutefois légèrement moins important qu'avec l'apport de digestat liquide (Fig. 35).

Dans les essais en bacs, la stabilité des agrégats du sol a été diminuée dans les deux sols « terre noire » et terre horticole 1 » suite à l'apport des fertilisants du commerce (Fig. 36). Les apports de digestat liquide dans ces deux terres se sont montrés également plutôt négatif sur la stabilité des agrégats (Fig. 36). Il faut toutefois rester prudent dans l'interprétation de ces résultats, une seule analyse par modalité sur un échantillon mélangé n'étant été effectué sur ces deux terres.

Dans la terre maraîchère, les apports de fertilisants n'ont pas influencés la stabilité des agrégats, alors que dans la terre horticole 2, toutes les modalités avec fertilisation l'ont augmenté (Fig. 36).

Dans l'essai en pleine terre, aucune différence significative n'a pu être mesurée quant à la stabilité des agrégats des diverses modalités (Fig. 37). Il faut toutefois souligner que, suite à l'utilisation intensive de cette serre et à la nature de sa terre, la qualité physique structure de ce sol est de manière générale mauvaise, et que la stabilité de ses agrégats est extrêmement faible.

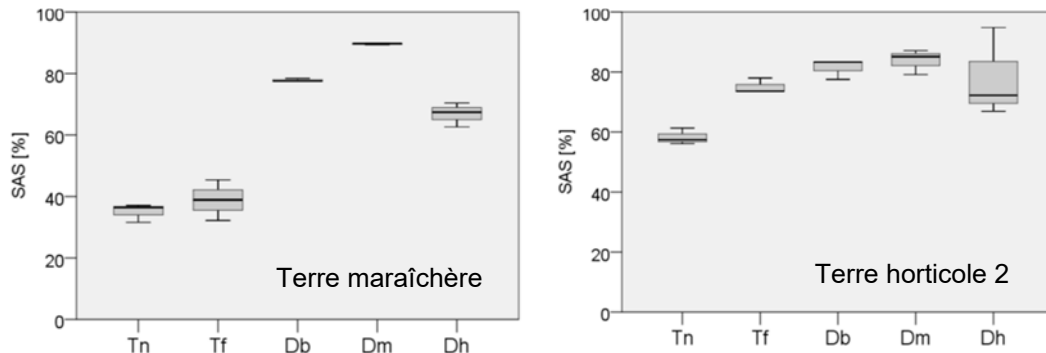


Fig. 35. Influence d'apport de fertilisants organiques sur la stabilité des agrégats de deux sols dans des essais en conditions contrôlées sans plantes.

Terre maraîchère : une terre provenant d'un sol de l'entreprise maraîchère Höneisen, Tännlihof, à Andelfingen (ZH). Terre horticole 2 : Leureko AG (Laufenburg-AG).

Tn : témoin non fertilisé ; Tf : témoin fertilisé (1,17 g raclures de corne, 3,47 g fumier de poules et 1,34 g Patentkali) ; Db : digestat liquide basse dose (58.6 g / litre de sol, correspond à Tf) ; Dm : digestat liquide dose moyenne (117,2 g / litre de sol) ; Dh : digestat liquide dose haute (175,8 g / litre de sol).

Chaque box représente 3 répétitions.

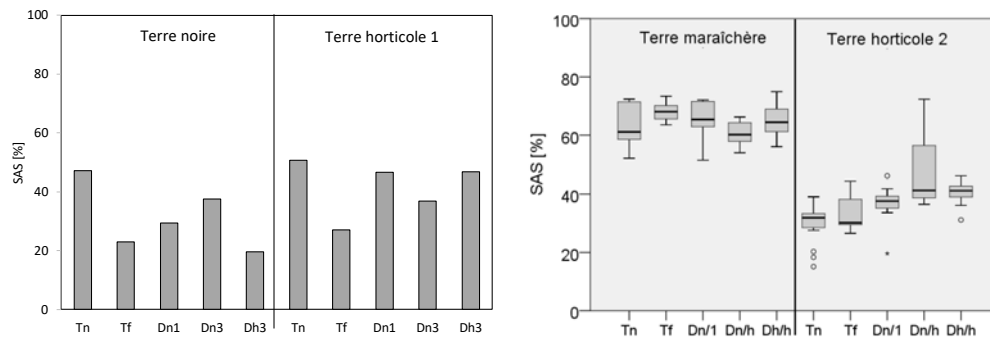


Fig. 36. Influence de la stratégie de fertilisation sur la stabilité des agrégats du sol lors des essais en bacs.

Description de l'essai: voir Fig. 28. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais. Terre noire et terre horticole 1 : réalisation d'une analyse par modalité avec des échantillons mélangés provenant des cinq bacs d'une modalité. Terre maraîchère et terre horticole 2 : chaque box correspond à l'analyse de 15 échantillons de sols (3 provenant de chacun des 5 bacs d'une modalité).

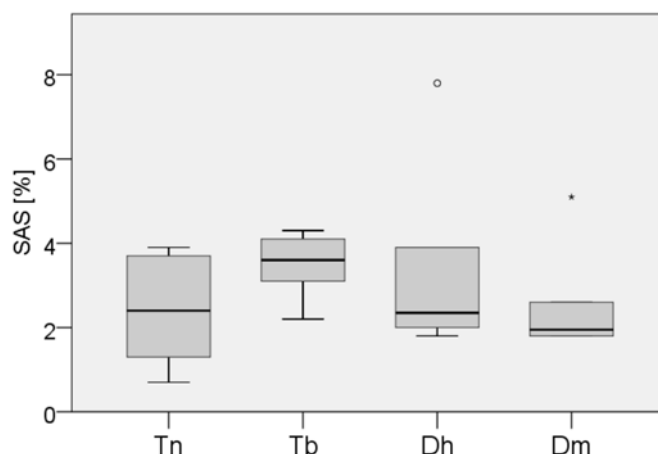


Fig. 37. Influence de la stratégie de fertilisation sur la stabilité des agrégats du sol lors de l'essai en pleine terre réalisé dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai: voir Fig. 16. Tn : témoin fertilisé seulement avec fumure de fond ; Tb : témoin avec fumure de fond et apport de Biorga pendant la culture. Dh : modalité avec fumure de fond puis apport hebdomadaire de digestat liquide. Dm : modalité avec fumure de fond puis apport mensuel de digestat liquide. Prélèvement des échantillons de sol réalisés à la fin de l'essai. Chaque box correspond à l'analyse de 6 échantillons de sols.

3.6 Effets de la fertilisation des sols sur leurs caractéristiques chimiques

Essais tomates en bacs

A moins d'une autre indication dans les figures, des prélèvements de terre des cinq bacs de chaque traitement ont été mélangés et un échantillon a été prélevé dans ce mélange pour être analysé. Il faut donc être prudent avec l'interprétation de ces résultats, une seule analyse (deux pour la capacité de rétention des sols) n'ayant ainsi été en partie réalisée par traitement.

La valeur pH des sols n'a pas été fortement influencée par la stratégie de fertilisation (Fig. 38). Il est toutefois à noter que, à l'exception de dans la terre horticole 1, les engrais du commerce ont eu un léger effet sur le pH du sol, l'abaissant quelque peu. Il est aussi intéressant de remarquer que, pour tous les traitements, le pH a baissé de près d'une demi-unité entre début août et la fin de l'essai en octobre dans la terre maraîchère et dans la terre horticole 2 (pour les autres terres, seules des analyses du pH à la fin de l'essai ont été réalisées).

La salinité des sols à la fin de l'essai (Fig. 39) était bien corrélée avec la teneur du sol en azote minéral dans la terre noire et dans la terre horticole 1, moins bien dans les deux autres terres (Fig. 40). Alors que la salinité de la terre noire et de la terre horticole 1 à la fin de l'essai a été augmentée par les apports de digestat liquide, elle est restée au même niveau que le témoin non fertilisé dans la terre maraîchère et dans la terre horticole 2 (Fig. 39). Dans toutes les terres, la teneur en azote minéral à la fin de l'essai était plus importante que dans le témoin non fertilisé (Fig. 40); l'apport fractionné de digestat résulte en une teneur finale en azote minéral du sol plus importante que si le digestat est donné en une fois, ce qui pourrait être dû à une diminution des pertes ammoniacales par le fractionnement des apports de digestat liquide. La modalité ayant reçu la dose élevée de digestat liquide contenait le plus d'azote minéral, celle-ci se situant alors au niveau de celle des témoins fertilisés (Fig. 40).

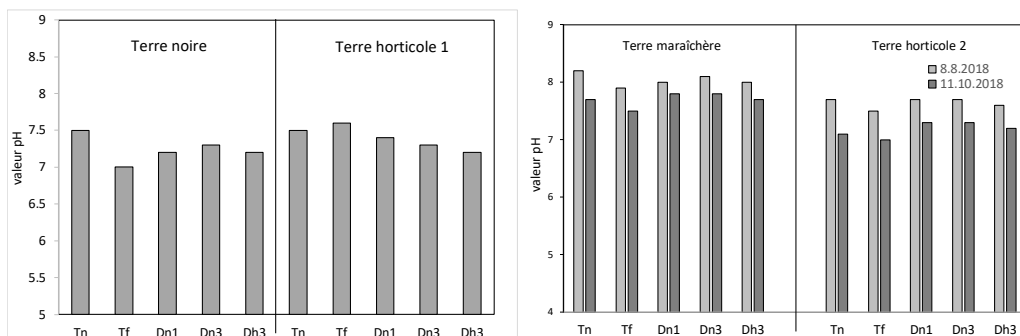


Fig. 38. Influence de la stratégie de fertilisation sur la valeur pH du sol lors des essais en bacs.

Description de l'essai: voir Fig. 28. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais. Réalisation d'une analyse par modalité avec des échantillons mélangés provenant des cinq bacs d'une modalité.

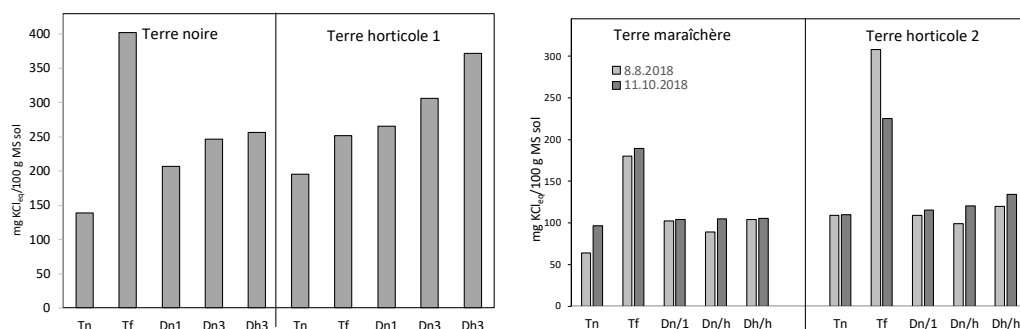


Fig. 39. Influence de la stratégie de fertilisation sur la salinité du sol lors des essais en bacs.

Description de l'essai: voir Fig. 28. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais, ainsi qu'en cours de culture (terre maraîchère et terre horticole 2). Réalisation d'une analyse par modalité avec des échantillons mélangés provenant des cinq bacs d'une modalité.

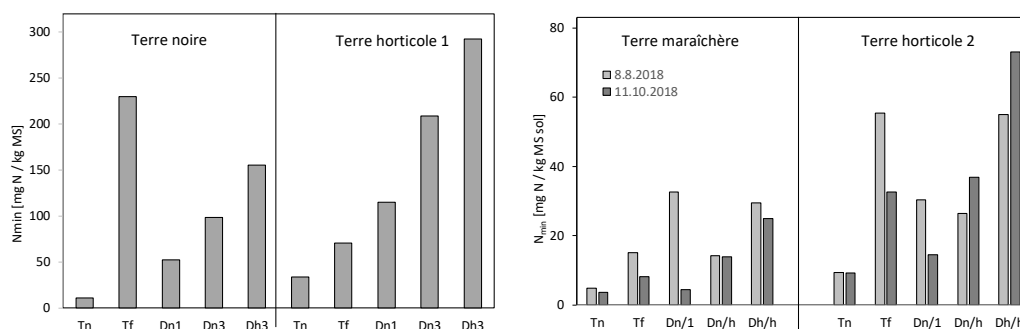


Fig. 40. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur en azote minéral du sol lors des essais en bacs.

Description de l'essai: voir Fig. 28. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais, ainsi qu'en cours de culture (terre maraîchère et terre horticole 2). Réalisation d'une analyse par modalité avec des échantillons mélangés provenant des cinq bacs d'une modalité.

De manière globale, les engrais du commerce ont principalement montré une forte augmentation des teneurs en potasse disponible, en calcium disponible et en magnésium disponible (Tab. 26), alors que la haute dose de digestat a provoqué une augmentation des teneurs du sol en phosphore disponible, et en potasse disponible et de réserve (Tab. 26). La fertilisation n'a pas modifié de manière notable la teneur en oligoéléments des sols (Tab. 27).

A la fin de l'essai, un test de fertilité Solvita a été réalisé par le laboratoire Ibu. Selon ce test, l'index de fertilité global des terres a augmenté dans toutes les variantes fertilisées (Tab. 27), l'effet dans la terre maraîchère étant plus important. Dans cette terre, les deux variantes avec le digestat liquide apporté de manière hebdomadaire a donné les meilleurs résultats.

Cet effet positif de ces deux variantes était également clairement visible au sujet de l'influence de la stabilité des agrégats (Tab. 27). Par contre, l'apport de fertilisants et en particulier de la haute dose de digestat liquide a influencé négativement la stabilité des agrégats du sol horticole (Tab. 27). La différence de teneur en calcium entre ces deux sols pourrait expliquer cela. Toutefois, ces résultats ne sont pas confirmés dans les essais de courte durée réalisés dans le sol sans plantes en conditions contrôlées (Fig. 35) ou par les analyses réalisées à la fin de l'essai en bacs 2018 au FiBL (Fig. 36) ou à la fin de l'essai en pleine terre réalisé en 2019 dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères.

Essais tomates en pleine terre

Les analyses de sol de début et de fin de la culture de tomates de 2018 ne présentent pas de différences notables entre les modalités en ce qui concerne le pH du sol et sa teneur en phosphore, alors que sa matière organique est légèrement supérieure à la fin de l'essai (Fig. 42). La salinité du sol et sa teneur en azote minéral, et en potasse sont plus faibles à la fin de l'essai en comparaison des valeurs au début de l'essai (Fig. 42). Pour toutes ces valeurs, aucune différence significative entre les diverses modalités n'est observable.

Il est toutefois possible de noter qu'un peu plus de Ca est disponible dans la modalité digestat hebdo par rapport aux autres en fin de culture. La salinité de cette modalité est également un peu plus élevée.

Les mesures mensuelles N_{min} dans les essais tomates sont comparables entre les modalités (Fig. 42). Quand il y avait un apport fractionné (Digestat 3x), les mesures ont été réalisées à chaque fois environ 1 semaine après l'apport. L'apport de digestat fractionné en 3x présente deux pics de N_{min} lors du 2ème; aucun pic n'a pu être observé lors des deux autres apports, car les plantes ont alors dû consommer rapidement l'azote lors de la plantation.

Dans l'essai salade, l'apport du digestat liquide en deux fois permet une quantité plus importante d'azote disponible pour les plantes (sous forme de nitrate) pendant la période principale de croissance des plantes que lorsque le digestat liquide ou l'engrais liquide de référence (Biorga NK) sont apportés en une fois au début de l'essai (Fig. 41).

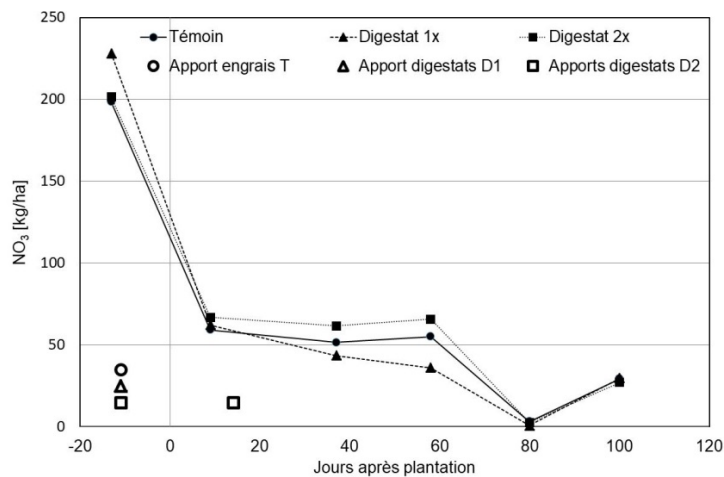


Fig. 41. Influence de la stratégie de fertilisation sur l'évolution de l'azote minéral dans le sol d'une culture de salades en pleine terre

Description de l'essai : voir Fig. 26. Témoïn: fumure de fond et fertilisation avec engrais liquide bio du commerce (Biorga NK) apporté juste avant la plantation. Digestat 1x : fumure de fond et digestat liquide apporté juste avant la plantation. Digestat 2x: fumure de fond et digestat liquide apporté en deux fois (juste avant la plantation et deux semaines après). Chaque valeur représente la moyenne de quatre répétitions.

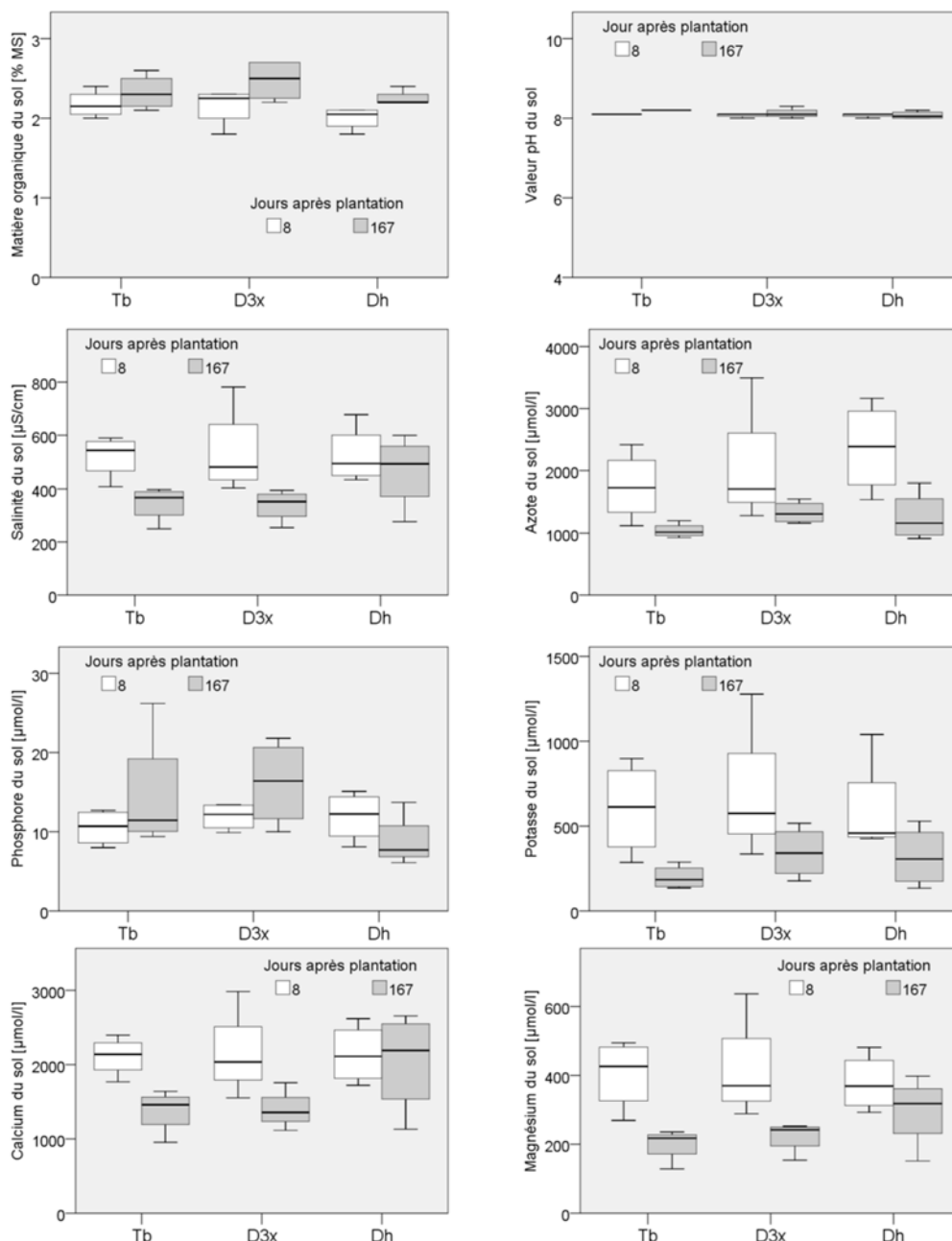


Fig. 42. Influence de la stratégie de fertilisation sur les caractéristiques chimiques du sol au début et à la fin de culture lors de l'essai tomates en pleine terre réalisé dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères en 2018.

Description de l'essai : voir Fig. 18. Tb : témoin bio : fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Digestat 3x : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en trois fois durant la culture. Dh : digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire. Chaque box correspond à 4 répétitions. Les analyses de sol ont été réalisées par le laboratoire Sol Conseil (CH-I 196 Gland).

Tab. 26. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur des sols en éléments nutritifs lors des essais en bacs (1 de 2).

Modalité		Terre maraîchère						Terre horticole 2					
		Début de l'essai	Échantillons prélevés à la fin de l'essai					Début de l'essai	Échantillons prélevés à la fin de l'essai				
			Tn	Tf	Dn/l	Dn/h	Dh/h		Tn	Tf	Dn/l	Dn/h	Dh/h
Eléments fertilisants réserve disponibles (H ₂ O10)													
Nitrate	mg/kg MS	21.7	1.7	7.4	5.3	18.6	35.7	9.4	5.5	27.2	25.7	36.6	43.9
Phosphore (P)	mg/kg MS	2.0	1.7	1.4	2.9	3.6	5.1	3.4	3.4	2.2	6.1	5.5	7.3
Potasse (K)	mg/kg MS	34.1	25.0	71.6	34.2	38.8	95.0	12.0	11.2	80.0	28.3	27.2	62.7
Calcium	mg/kg MS	158.1	249.0	440.2	287.6	241.4	200.2	107.7	272.2	635.4	241.4	281.6	223.4
Magnésium	mg/kg MS	10.1	20.9	48.4	24.0	21.2	20.0	8.8	18.4	64.5	19.3	20.6	19.0
Eléments fertilisants réserve (AAE10)													
Phosphore (P)	mg/kg MS	36.4	37.8	46.8	56.5	57.3	77.7	86.8	100.5	129.8	140.4	142.8	182.4
Potasse (K)	mg/kg MS	96.5	55.0	107.5	75.8	76.8	184.6	79.3	58.5	178.8	103.7	98.2	187.3
Calcium	mg/kg MS	57730.0	59650.0	60100.0	58940.0	60810.0	60340.0	3951.0	6198.0	5753.0	5757.0	5589.0	5943.0
Magnésium	mg/kg MS	505.9	530.7	579.3	531.4	555.1	546.5	141.1	194.4	290.0	208.8	200.6	223.8

Essai en bacs de 25 litres. Tn : témoin non fertilisé. Tf : témoin fertilisé (170 kg Ndisp/ha) avec par bac 28,1 g de raclure de corne, - 83,3 g de fumier de poules et 32,2 g de Patentkali® (dose d'azote totale : 170 kg/ha). Dn1 : 1 apport de digestat liquide (170 kg Ndisp/ha, soit 1,5 l/bac). Dn3 : 3 apports de digestat liquide (3 x 57 kg Ndisp/ha, soit 3 x 0,5 l/bac). Dh3 : 3 apports de digestat liquide (3 x 170 kg Ndisp/ha, soit 3 x 1,5 l/bac). Dn/h : 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 21 kg Ndisp/ha, soit 8 x 0,2 l/bac). Dh/h : 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 64 kg Ndisp/ha, soit 8 x 0,6 l/bac). Terre noire et terre horticole 1 : plantation des tomates (variété « Cherry Sweet ») le 15 mai 2017. Terre maraîchère et terre horticole 2 : plantation des tomates (variété « Favorita ») le 10 mai 2018. Fin de l'essai 11 octobre 2018.

Tab. 27. Influence de la stratégie de fertilisation sur la teneur des sols en éléments nutritifs lors des essais en bacs (2 de 2).

		Terre maraîchère						Terre horticole 2					
Modalité		Début de l'essai	Échantillons prélevés à la fin de l'essai					Début de l'essai	Échantillons prélevés à la fin de l'essai				
			Tn	Tf	Dn/l	Dn/h	Dh/h		Tn	Tf	Dn/l	Dn/h	Dh/h
Oligoéléments													
Bore	mg/kg	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.8	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1
Manganèse	mg/kg	199.0	213.0	208.0	214.0	225.0	217.0	189.0	199.0	193.0	201.0	191.0	197.0
Cuivre	mg/kg	5.5	6.8	6.3	6.7	7.1	7.3	7.9	9.7	9.8	10.2	9.8	10.1
Fer	mg/kg	385.0	488.0	465.0	484.0	505.0	506.0	232.0	305.0	302.0	325.0	326.0	350.0
Test de fertilité selon SOLVITA													
Biologie (test CO ₂)			92.6	143.0	132.0	148.0	132.0		154.0	198.0	215.0	191.0	215.0
Chimie (humus-N)			40.0	40.0	47.5	50.0	60.0		95.0	118.0	110.0	108.0	118.0
Physique (stabilité agrégats)			27.0	27.0	34.0	47.0	47.0		47.0	37.0	37.0	37.0	29.0
Index de fertilité du sol			15.5	19.7	20.8	24.8	24.1		27.8	30.8	31.8	29.7	30.5

Description de l'essai: voir Tab. 26.

3.7 Effet de la fertilisation des sols sur leur activité biologique

Peu de différences ont été observées entre les diverses modalités en ce qui concerne l'activité FDA du sol. L'activité biologique est un peu plus élevée dans les modalités avec digestat comparativement à la modalité témoin bio. A l'exception d'une activité FDA légèrement supérieure dans le sol avec un apport hebdomadaire de digestat liquide dans l'essai tomates 2018 (Fig. 43), aucune différence n'a pu être mise en évidence entre les modalités avec fertilisation liquide dans l'essai tomate 2019, dans l'essai mâche ou dans l'essai salade (Fig. 44, Fig. 45 et Fig. 46). Par contre, la modalité sans fertilisation liquide avait une activité FDA plus faible que les autres modalités (Fig. 44, Fig. 45 et Fig. 46).

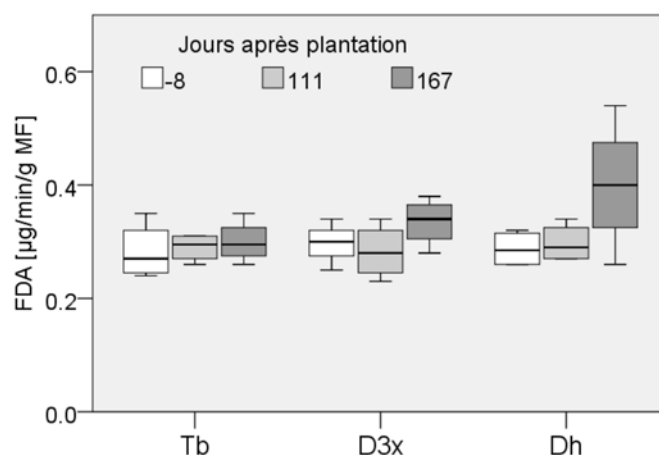


Fig. 43. Influence de la stratégie de fertilisation sur l'activité biologique dans le sol au début, au milieu et à la fin de culture lors de l'essai en pleine terre réalisé dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères en 2018.

Description de l'essai : voir Fig. 18. Tn : témoin fertilisé seulement avec fumure de fond ; Tb : témoin avec fumure de fond et apport de Biorga pendant la culture. Dh : modalité avec fumure de fond puis apport hebdomadaire de digestat liquide. Dm : modalité avec fumure de fond puis apport mensuel de digestat liquide. Chaque box correspond à 4 répétitions.

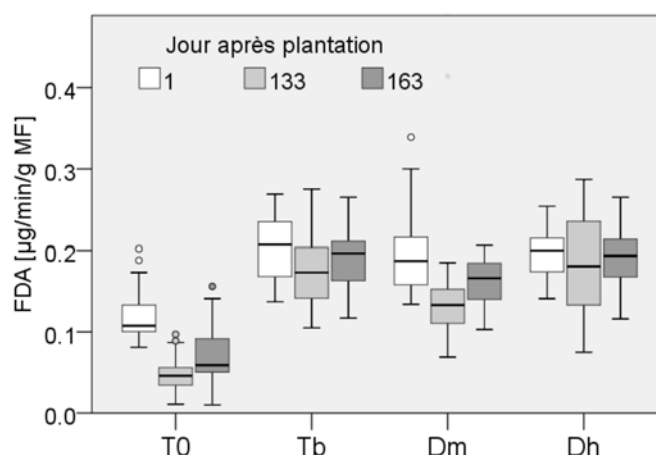


Fig. 44. Influence de la stratégie de fertilisation sur l'activité biologique dans le sol au début, au milieu et à la fin de culture lors de l'essai en pleine terre réalisé dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai : voir Fig. 18. T0 : témoin avec seulement la fertilisation de fond. Tb : témoin bio : fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Dm : digestat mensuel : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport toutes les quatre semaines. Dh : digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire. Chaque boîte à moustache correspond à 4 répétitions.

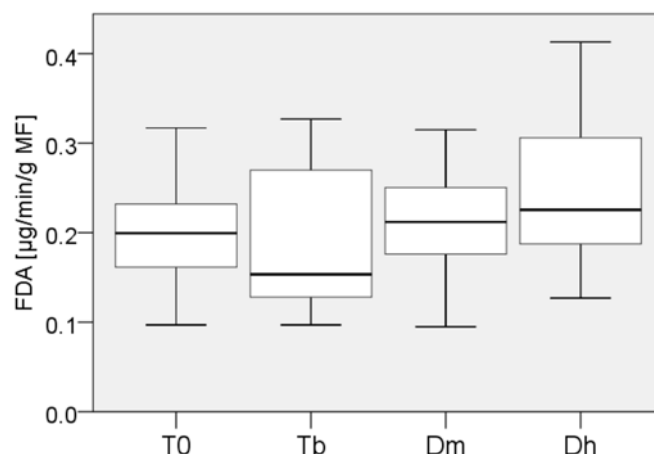


Fig. 45. Influence de la stratégie de fertilisation sur l'activité biologique dans le sol à la fin d'une culture de mâche semée en pleine terre directement à la fin de l'essai tomates réalisé à Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai tomates : voir Fig. 18. La mâche a été semée le 3 octobre 2019 sur les parcelles de l'essai tomates et n'ont reçu aucune fertilisation supplémentaire. La récolte des plantes a été effectuée le 5 novembre 2019. To : Témoin avec seulement fumure de fond (50%). Tb : To : Témoin avec seulement fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais liquide bio du commerce (Biorga NK). Dm: fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport en toutes les quatre semaines. Dh: fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire. Chaque boîte à moustaches correspond à quatre répétitions.

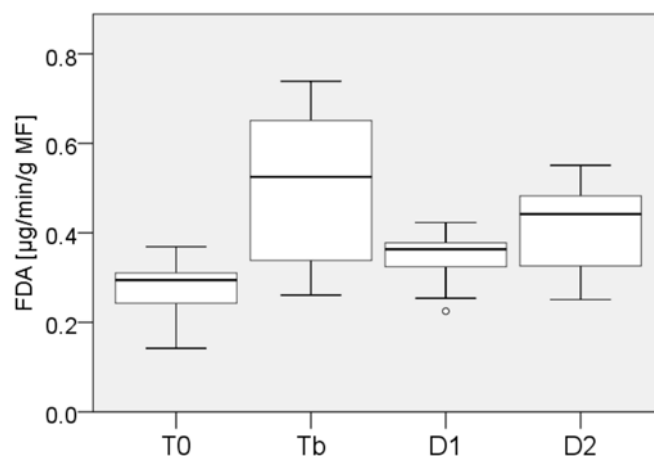


Fig. 46. Influence de la stratégie de fertilisation sur l'activité biologique dans le sol à la fin d'une culture salades dans des cultures en pleine terre.

Description de l'essai : Fig. 26. T0 : fumure de fond. Tb : fumure de fond et fertilisation avec engrais liquide bio du commerce (Biorga NK) apporté juste avant la plantation. D1: fumure de fond et digestat liquide apporté juste avant la plantation. D2: fumure de fond et digestat liquide apporté en deux fois (juste avant la plantation et environ quatre semaines après). Chaque boîte à moustache représente les valeurs de quatre répétitions.

3.8 Effet du digestat liquide sur leur réceptivité aux maladies

Essais en conditions contrôlées

Lors de ces essais, du digestat ou des engrais du commerce ont été mélangés aux terres utilisées pour les essais en bacs. Après une semaine, les agents pathogènes *Pythium ultimum* ou *Rhizoctonia solani* y ont été ajoutés et les plantes (cresson ou basilic) semées. L'évolution de la maladie sur ces dernières a alors été observé.

La fertilisation organique testée n'a guère influencé le développement de la maladie de la fonte des semis du cresson causée par *P. ultimum* (Fig. 47). Dans la terre noire et la terre horticole 1, la pression de la maladie était faible, pratiquement aucune diminution du poids des plantes n'étant observable dans le témoin non fertilisé. Dans ces deux sols, une diminution du poids des plantes n'a pu être observée que dans le sol horticole 1 après l'apport de digestat liquide (Fig. 47). Dans la terre maraîchère et la terre horticole 2, une diminution claire du poids des plantes a été causée par *P. ultimum* dans le témoin non fertilisé. Dans ces deux sols, les engrais organiques du commerce et le digestat liquide ont légèrement diminué l'effet du pathogène, mais sans protéger vraiment efficacement les plantes contre cette maladie (Fig. 47).

L'apport des engrais organique ou du digestat liquide n'ont pas non plus diminué l'influence de la maladie causée par *R. solani* sur le basilic dans les deux sols testés (Fig. 48). Dans la terre horticole, le digestat liquide a même causé une augmentation de la maladie lorsque l'agent pathogène était apporté à une dose plus importante (Fig. 48).

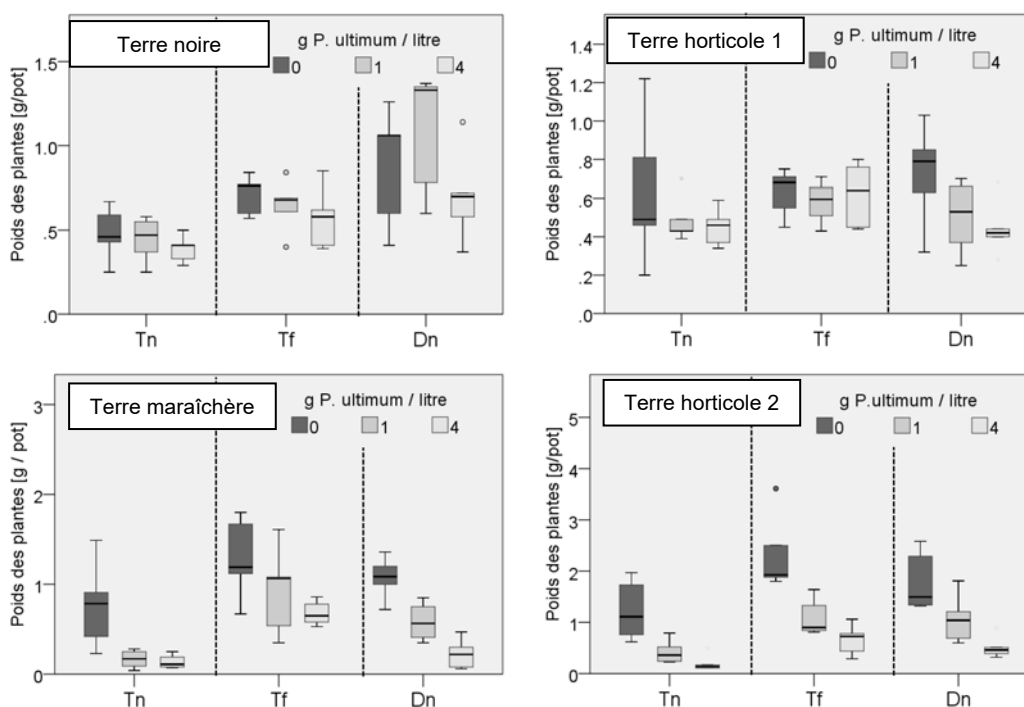


Fig. 47. Influence d'apport de fertilisants organiques sur la réceptivité de quatre sols à la fonte des semis du cresson, agent pathogène *Pythium ultimum*, en conditions contrôlées.

Tn : témoin non fertilisé; Tf : témoin fertilisé avec par litre 1,17 g de raclures de corne, 3,47 g de fumier de poules et 1,34 g de Patentkali. Dn : sol fertilisé avec 105,9 g de digestat liquide par litre. Une semaine après la fertilisation de la terre, l'agent pathogène a été ajouté au sol et les plantes semées. Chaque box correspond à 6 répétitions.

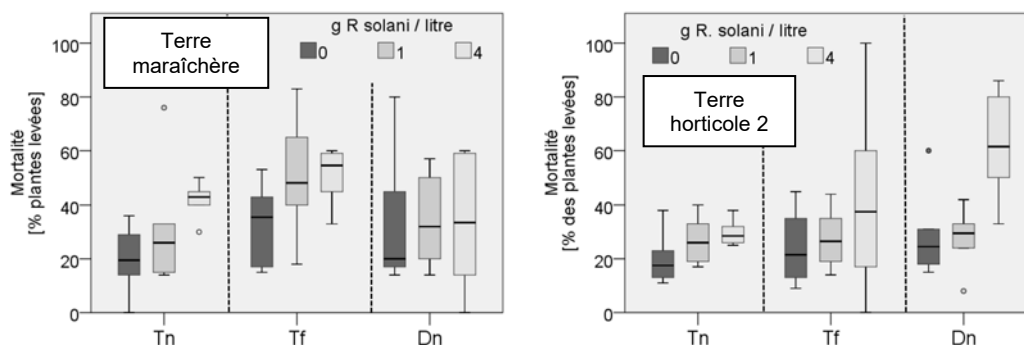


Fig. 48. Influence d'apport de fertilisants organiques sur la réceptivité de deux sols à la pourriture du collet du basilic, agent pathogène *Rhizoctonia solani*, en conditions contrôlées.
Description de l'essai : voir Fig. 47

Réceptivité du sol des essais en bacs

A la fin des essais de production des tomates, des échantillons de terre des diverses modalités ont été prélevés, et leur réceptivité aux maladies causées par *P. ultimum* et *R. solani* ont été testées.

Dans la terre de noire, l'incidence de la maladie causée par *P. ultimum* a été de manière générale pratiquement nulle le poids des plantes ne variant pas même avec une dose élevée de *P. ultimum* (Fig. 49 et Fig. 50). Dans les trois autres terre, l'incidence de la maladie était clairement observable (Fig. 49, Fig. 50 et Fig. 51). Aucune différence significative n'a été observé entre les diverses modalités fertilisées (Fig. 49, Fig. 50 et Fig. 51).

En ce qui concerne *R. solani*, l'essai avec la terre horticole 1 n'a pas pu être évalué, la germination et la croissance du basilic y étant été trop mauvaise, et ceci également dans la modalité sans apport d'agent pathogène.

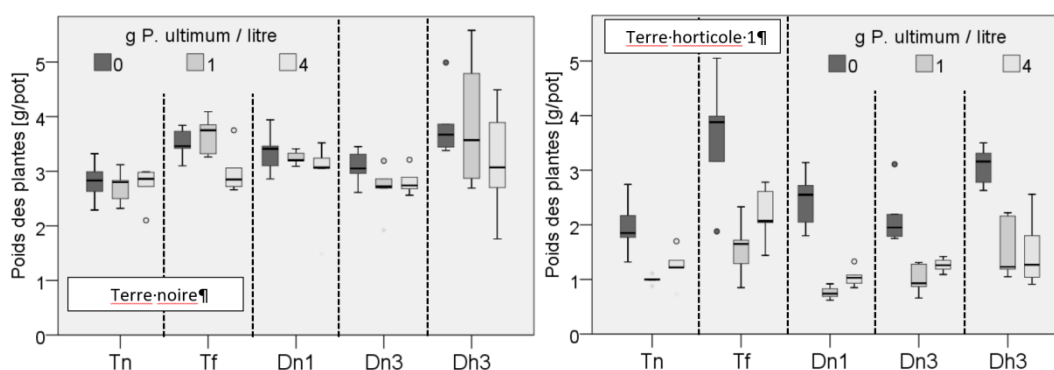


Fig. 49. Influence de la stratégie de fertilisation sur la réceptivité du sol à *Pythium ultimum*.

Essai en bacs de 25 litres. Tn : témoin non fertilisé. Tf : témoin fertilisé (170 kg N_{disp}/ha) avec par bac 28,1 g de raclure de corne, - 83,3 g de fumier de poules et 32,2 g de Patentkali® (dose d'azote totale : 170 kg/ha). Dn1 : 1 apport de digestat liquide (170 kg N_{disp}/ha , soit 1,5 l/bac). Dn3 : 3 apports de digestat liquide (3 x 57 kg N_{disp}/ha , soit 3 x 0,5 l/bac). Dh3 : 3 apports de digestat liquide (3 x 170 kg N_{disp}/ha , soit 3 x 1,5 l/bac). Terre noire et terre horticole 1 : plantation des tomates (variété « Cherry Sweet ») le 15 mai 2017. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais. Réalisation des essais avec par modalité un mélange de terre réalisé avec des échantillons provenant des cinq bacs d'une modalité.

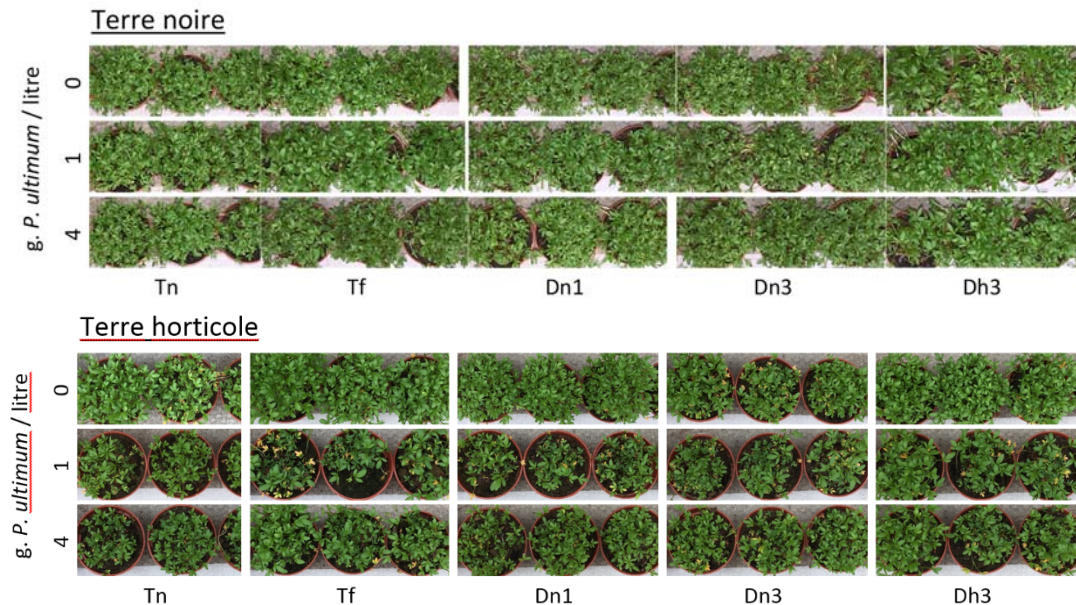


Fig. 50. Influence de la stratégie de fertilisation sur la réceptivité du sol à *Pythium ultimum*.

Description de l'essai: voir Fig. 49. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais. Réalisation des essais avec par modalité un mélange de terre réalisé avec des échantillons provenant des cinq bacs d'une modalité.

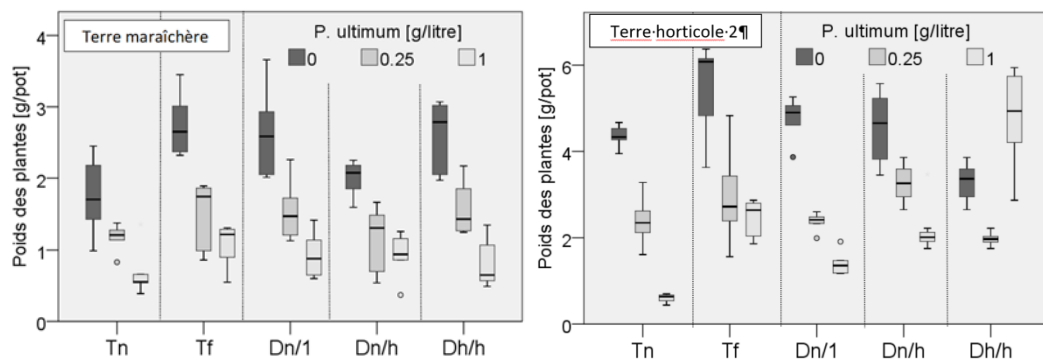


Fig. 51. Influence de la stratégie de fertilisation sur la réceptivité du sol à *Pythium ultimum* dans un essai de tomates en bacs.

Essai en bacs de 25 litres. Tn : témoin non fertilisé. Tf : témoin fertilisé (170 kg Ndisp/ha) avec par bac 28,1 g de raclure de corne, - 83,3 g de fumier de poules et 32,2 g de Patentkali® (dose d'azote totale : 170 kg/ha). Dn1 : 1 apport de digestat liquide (170 kg Ndisp/ha, soit 1,5 l/bac). Dn3: 3 apports de digestat liquide (3 x 57 kg Ndisp/ha, soit 3 x 0,5 l/bac). Dh3: 3 apports de digestat liquide (3 x 170 kg Ndisp/ha, soit 3 x 1,5 l/bac). Dn/h: 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 21 kg Ndisp/ha, soit 8 x 0,2 l/bac). Dh/h: 8 apports bi-hebdomadaires de digestat liquide (8 x 64 kg Ndisp/ha, soit 8 x 0,6 l/bac). Terre noire et terre horticole 1 : plantation des tomates (variété «Cherry Sweet») le 15 mai 2017. Terre maraîchère et terre horticole 2 : plantation des tomates (variété «Favorita») le 10 mai 2018.

Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais. Réalisation des essais avec par modalité un mélange de terre réalisé avec des échantillons provenant des cinq bacs d'une modalité. Chaque box est la moyenne de 6 répétitions.

Dans la terre noire, la mortalité des plantes de basilic était observable aussi bien dans les modalités sans qu'avec apport de *R. solani*. Ceci indique que la terre était elle-même déjà infestée avec des agents pathogènes. L'ajout de *R. solani* n'a pas augmenté la pression de la maladie (Fig. 52). Il est intéressant de noter que l'incidence de la maladie était de manière générale nettement plus élevée dans la modalité non fertilisée, toutes les modalités fertilisées donnant des résultats comparables (Fig. 52).

Dans la terre maraîchère et dans la terre horticole 2, *R. solani* n'a pas provoquer de mortalité des plantes, cette dernière étant de manière générale très faible (Fig. 53). Par contre, elle a influencé le poids des plantes dans les modalités fertilisées (Fig. 53). Le poids des plantes de basilic étant faible même sans apport d'agent pathogène, il n'a pas varié dans cette modalité. Dans les variantes fertilisées, l'augmentation des doses de *R. solani* a provoquer une forte diminution du poids des plantes dans les modalités fertilisées avec les engrais du commerce et avec la haute dose de digestat liquide (Fig. 53). Avec la faible dose de digestat liquide, la diminution de poids des plantes n'était guère influencée par l'apport d'agent pathogène, et ceci surtout si le digestat liquide était apporté de manière fractionnée (Fig. 53).

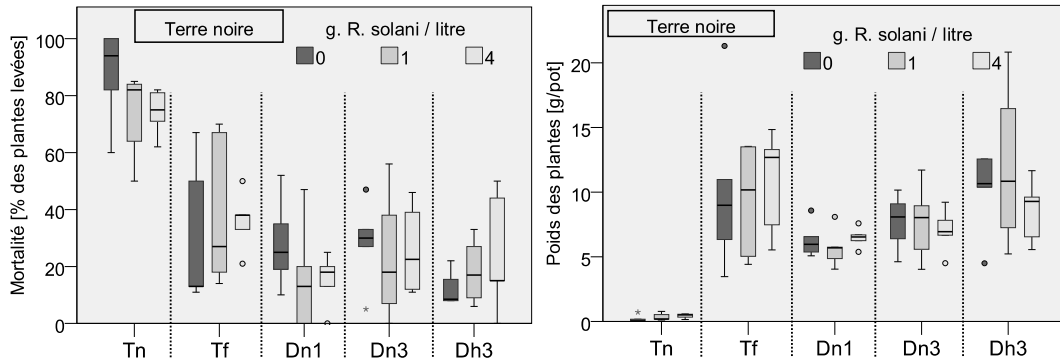


Fig. 52. Influence de la stratégie de fertilisation sur la réceptivité du sol à *Rhizoctonia solani* dans un essai de tomates en bacs.

Description de l'essai: voir Fig. 49. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais. Réalisation des essais avec par modalité un mélange de terre réalisé avec des échantillons provenant des cinq bacs d'une modalité. Chaque box est la moyenne de 6 répétitions.

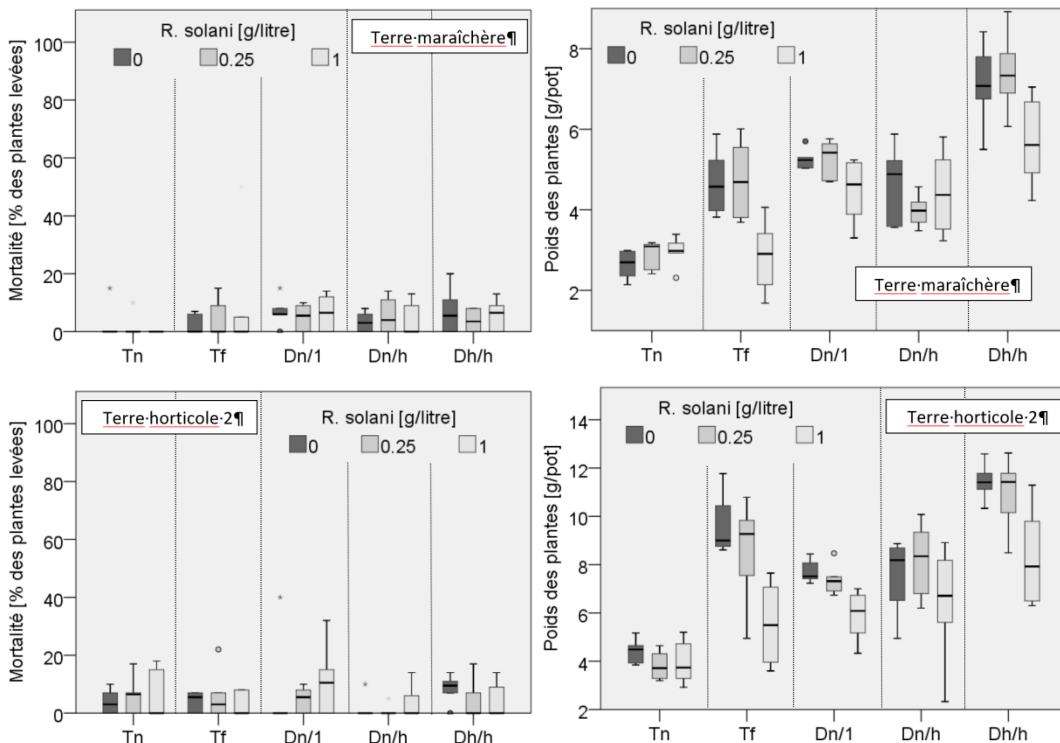


Fig. 53. Influence de la stratégie de fertilisation sur la réceptivité du sol à *Rhizoctonia solani* dans un essai de tomates en bacs.

Description de l'essai: voir Fig. 51. Prélèvement des échantillons de sols à la fin des essais. Réalisation des essais avec par modalité un mélange de terre réalisé avec des échantillons provenant des cinq bacs d'une modalité. Chaque box est la moyenne de 6 répétitions.

Réceptivité du sol des essais en pleine terre

A la fin des essais de production des tomates, des échantillons de terre des diverses modalités ont été prélevés, et leur réceptivité aux maladies causées par *P. ultimum* et *R. solani* ont été testées.

Peu de différences ont été observées entre les terres provenant des différentes modalités. Dans le cas de *P. ultimum*, les variantes avec digestat liquide, en particulier lorsque celui-ci était apporté de manière hebdomadaire, ont à la fin de l'essai une terre moins sensible à cette maladie que celle provenant de la fertilisation liquide bio de référence (Fig. 54), ce qui se traduit par une diminution moins importante du poids des plantes entre la modalité sans et les modalités avec l'ajout du pathogène. Le contraire est observable dans le cas de *R. solani* (Fig. 55), une mortalité plus importante étant observable avec déjà de petites quantités de pathogène.

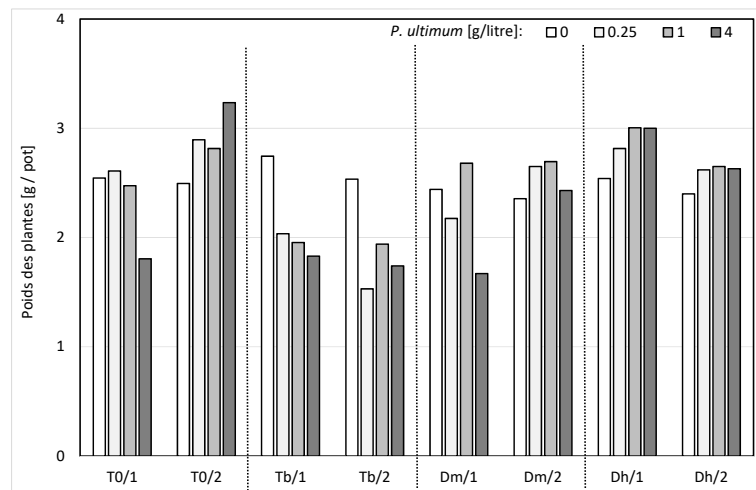


Fig. 54. Influence de la stratégie de fertilisation sur la réceptivité du sol à *Pythium ultimum* dans un essai de tomates en pleine terre réalisé dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai : voir Fig. 18.

T0 : témoin avec seulement la fertilisation de fond. Tb : témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Dm : digestat mensuel : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport toutes les quatre semaines. Dh : digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.

Pour chaque modalité, la terre des blocs 1 et 2 et ceux des blocs 3 et 4 ont été mélangés pour la réalisation du test de réceptivité, ce qui donne deux répétitions par variante (/1 et /2).

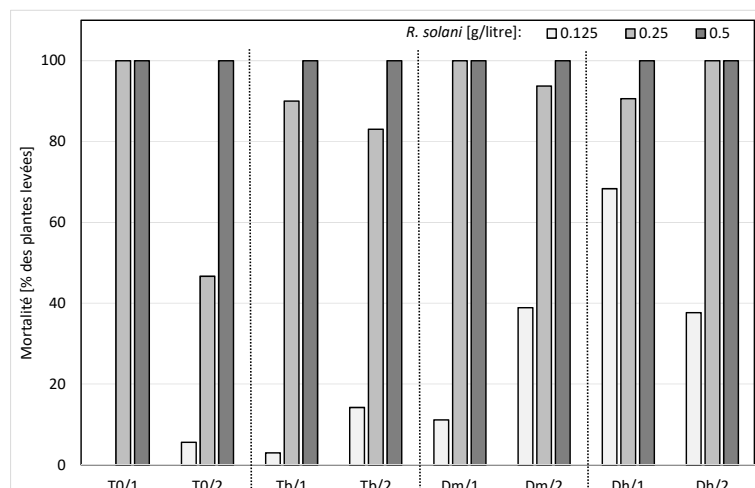


Fig. 55. Influence de la stratégie de fertilisation sur la réceptivité du sol à *Rhizoctonia solani* dans un essai de tomates en pleine terre réalisé dans la serre expérimentale d'Agroscope-Les Fougères en 2019.

Description de l'essai : voir Fig. 18.

T0 : témoin avec seulement la fertilisation de fond. Tb : témoin bio: fumure de fond (50%) et fertilisation hebdomadaire avec engrais bio du commerce. Dm : digestat mensuel : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport toutes les quatre semaines. Dh : digestat hebdo : fumure de fond (50%) et digestat liquide (50%), apport hebdomadaire.

Pour chaque modalité, la terre des blocs 1 et 2 et ceux des blocs 3 et 4 ont été mélangés pour la réalisation du test de réceptivité, ce qui donne deux répétitions par variante (/1 et /2).

3.9 Aspects économiques de l'utilisation de digestat liquide

Un calcul visant à étudier l'impact économique de l'utilisation de digestat comme engrais lors des cultures successives d'hiver (salade) et de printemps/été (tomate) par comparaison à l'utilisation d'engrais biologiques conventionnels a été effectué. Dans ces calculs, nous avons fixé le coût de digestat à 20.- CHF le m³. Ce coût comprend 10.- CHF/m³ pour le produit digestat avec la livraison sur site ainsi que 10.- CHF/m³ pour les frais de préparation du produit (filtration) ainsi que des frais inhérents à la distribution du produit par les systèmes gouttes à gouttes sur site. Concernant l'engrais biologique de référence (Biorga NK Engrais liquide, Hauert HBG Dünger AG, Dorfstrasse 12, 3257 Grossaffoltern), nous l'avons estimé à un coût moyen de 2.- CHF/litre.

Dans le calcul des coûts, seuls les engrais liquides ont été comptabilisés étant donné que l'engrais de fond a été appliqué à toutes les stratégies de fertigation et ne présente donc pas de différence de coût.

Concernant les cultures de salades, l'utilisation du digestat comme engrais liquide a permis une économie de l'ordre de 80% comparée à l'utilisation de l'engrais biologique de référence (Tab. 28). En 2018-19, cette économie a été de l'ordre de 1040.- CHF/ha et de 1584.- CHF/ha en 2019-20. Pour les tomates, la réduction des coûts due à l'utilisation du digestat avoisine les 88% (Tab. 29). En 2018, cette économie était de 4034.- CHF/ha et de 5253.- CHF/ha en 2019.

Tab. 28. Coûts des engrais utilisés lors des cultures d'hiver (salade). M1 : témoin bio, M2 et M3 : tests avec le digestat utilisé comme engrais appliqué en de façon hebdomadaire ou mensuelle.

Stratégie de fertigation	2018 - 2019		2019 - 2020	
	Quantité d'engrais (kg/ha ou l/ha)	Coûts (CHF/ha)	Quantité d'engrais (kg/ha ou l/ha)	Coûts (CHF/ha)
M1 Engrais bio liq. BiorgaNK (6% N) ¹	650	1300	990	1980
M2 et M3 Digestat liq. (0.3% N) ²	13'000	260	19'500	396

¹Biorga NK: engrais liquide de Hauert HBG Dünger AG, Dorfstrasse 12, 3257 Grossaffoltern, prix moyen 2. CHF/litre

²Coût de digestat estimé à 20.-fr le m³ (10.- CHF/m³ pour le produit digestat avec la livraison sur site ainsi que 10.- CHF /m³ pour les frais de préparation du produit (filtration) ainsi que des frais inhérents à la distribution du produit par les systèmes gouttes à gouttes sur site)

Tab. 29. Coûts des engrais utilisés lors des cultures de printemps (tomate). M1 : témoin bio, M2 et M3: test avec le digestat utilisé comme engrais appliqué de façon mensuelle ou hebdomadaire.

Stratégie de fertigation	2018 - 2019		2019 - 2020	
	Quantité d'engrais (kg/ha ou l/ha)	Coûts (CHF/ha)	Quantité d'engrais (kg/ha ou l/ha)	Coûts (CHF/ha)
M1 Engrais bio liq. BiorgaNK (6% N) ¹	2'283	4'566	2'985	5'969
M2 et M3 Digestat liq. (0.3% N) ²	26'620	532	35'791	716

¹Biorga NK: engrais liquide de Hauert HBG Dünger AG, Dorfstrasse 12, 3257 Grossaffoltern, 2 CHF/litre (prix moyen)

²Coût de digestat estimé à 20.-fr le m³ (10.- CHF/m³ pour le produit digestat avec la livraison sur site ainsi que 10.- CHF /m³ pour les frais de préparation du produit (filtration) ainsi que des frais inhérents à la distribution du produit par les systèmes gouttes à gouttes sur site)

4. Discussion des résultats

4.1 Considération préalable

Les digestats liquides provenant d'installation Kompogas contiennent, suivant les intrants traités, en moyenne 2,5 kg d'azote disponible par m³ (selon Suisse Bilan), ainsi que 1,9 kg/m³ de P₂O₅, 4,5 kg/m³ de K₂O et 1,0 kg/m³ de magnésium (selon la banque de donnée de l'Inspectorat suisse du compostage et de la méthanisation CVIS de 2013-2019). En considérant les normes de fumure pour une récolte de 18 kg de tomates par m² (selon GRUD 2016), une fertilisation par are de 2,5 kg d'azote, de 1 kg de P₂O₅, de 5 kg de K₂O et de 0,8 kg de Mg sont nécessaires. En donnant la moitié de la fertilisation azotée en fumure de fond, les 1,25 kg d'azote à apporter par fertilisation liquide correspondent à environ 500 litres de digestat liquide brut par are. Un tel apport de digestat couvre 95% des besoins totaux en phosphore, 45% des besoins en potasse et 61% des besoins en magnésium. Le reste de la potasse et du magnésium peut sans problème être apporté en fumure de fond. Pour le phosphore, une certaine prudence est à recommander pour ne pas sur-fertiliser la parcelle. Ces calculs simples montrent que, du point de vue théorique du calcul du bilan de fumure, une fertilisation liquide apportant l'azote nécessaire à la culture de tomate est donc réaliste.

4.2 Aspects techniques

Afin de pouvoir être appliqués dans la pratique, une solution technique praticable pour l'apport des digestats liquides provenant d'installation Kompogas doit être à disposition des producteurs.

Dans les serres commerciales, la fertilisation liquide est réalisée plus ou moins de manière automatique au moyen de la fertigation. Le problème rencontré par le digestat brut est qu'il contient des particules de matières organiques ainsi que du sable. Ces matières plus ou moins solides ne représentent guère de problèmes pour l'épandage du digestat en champ au moyen de pendillard, mais ne sont pas compatibles avec la fertigation, car elles bouchent les goutteurs. Un prétraitement du digestat brut sur l'installation de méthanisation, comme la centrifugation effectuée sur l'installation Ecobois de Vétroz, permet d'éliminer la majorité du sable contenu dans le digestat liquide. Il reste cependant des fibres organiques en suspension dans ce produit.

Dans le cadre du présent projet, différents goutteurs employés dans la pratique ont été testés quant à leur compatibilité avec une fertigation basée sur le digestat liquide dilué à 50% et tamisé (0,5mm), en combinaison avec un préfiltre (100 microns) placé sur la conduite du système. Ces essais ont clairement montré que les goutteurs de type T-Tape ne sont pas aptes à être utilisés avec le digestat liquide. Par contre, les systèmes de types UniRam et NetaFim ont été utilisés avec satisfaction. Toutefois, les filtres installés dans le système nécessitent un nettoyage régulier pour maintenir l'efficacité de la distribution du digestat liquide. Un relativement nouveau système de filtre autonettoyant (système ARKAL SPIN KLIN) pourrait résoudre ce problème et permettre une fertigation des serres avec le digestat liquide sans nécessiter un grand entretien. Ce système doit être testé suite au présent projet.

En ce qui concerne les producteurs travaillant dans des systèmes de dimension modeste, comme de nombreux agriculteurs bio travaillant avec une culture de tomate en tunnels, un système d'épandage plus simple est tout à fait envisageable et praticable. Ainsi, l'apport du digestat liquide peut être réalisé manuellement avec des arrosoirs ou semi-manuellement avec un chariot supportant un réservoir pour le digestat liquide et un apport au pied des

tomates avec un simple tuyau. Dans ce cas, le diamètre du tuyau est assez important pour que les particules en suspension dans le digestat liquide ne cause aucun problème.

4.3 Effet du digestat liquide sur la croissance des plantes et sur leur production

La question essentielle à répondre ici est de savoir si le digestat liquide peut permettre une production de tomates égale en quantité et en qualité à un fertilisant bio du commerce. Ces fertilisants bio sont relativement chers et une alternative plus avantageuse serait appréciée par les producteurs.

Dans des conditions stressantes pour les plantes dues à un volume de terre restreint pour leurs racines, comme dans l'essai réalisé aux Fougères dans des pots de 10 litres, le digestat liquide a montré ses limites et n'a pas permis une production de tomates arrivant au niveau du témoin avec fertilisation bio du commerce, et encore moins au témoin avec fertilisation minérale. Dans ce système, aussi bien les mesures concernant la physiologie de la plante, le rendement en tomates et la qualité des fruits étaient un peu plus faible avec la fertilisation réalisée avec le digestat liquide.

Par contre, dans des systèmes moins limitant, que ce soit en bacs de 25 litres ou en pleine terre, la plupart des caractéristiques des plantes ne se différenciaient pas entre le témoin avec fertilisation bio et ceux avec fertilisation par digestat liquide. De même, les quantités de tomates récoltées ne montraient pas de différences significatives entre les modalités différemment fertilisées. Et ceci dans toutes les terres testées (quatre terres dans le système en bacs, et deux essais en pleine terre).

Aucune différence entre les modalités n'a non plus pu être observée en ce qui concerne la qualité des fruits produits et leurs qualités gustatives.

Dans l'essai mâche réalisé après tomates sur la base des restes de fertilisation de cette première culture, la production était tendanciellement plus importante dans les modalités avec le digestat liquide, en particulier lorsque celui-ci était apporté de manière hebdomadaire pendant la culture de tomate. Cela voudrait signifier que de tels apports laissent un sol plus fertile à la fin de la culture.

Trois essais de fertilisation ont également été réalisés avec de la salade. Dans tous ces essais, la croissance des salades était au moins aussi importante dans la modalité avec le digestat liquide en comparaison avec le témoin avec fertilisation bio du commerce, et que la qualité des plantes était également au moins aussi bonne.

Tous les essais réalisés ont ainsi clairement montré que le digestat liquide représente une alternative valable aux fertilisants du commerce en production biologique.

4.4 Évaluation des risques environnementaux et sur la fertilité des sols suite à l'utilisation du digestat liquide

Les résultats de production des plantes sont très prometteurs. Toutefois, pour que l'emploi de digestat liquide puisse se propager dans la pratique, il faut encore s'assurer que cet engrais ne représente pas de risques pour l'environnement ou pour la fertilité du sol. Différents aspects ont à ce sujet été étudiés.

Un premier risque pourrait être un lessivage de fertilisants, en particulier d'azote, suite à l'apport de digestat liquide. En effet, une partie importante de l'azote est présente sous forme minérale dans le digestat liquide. Lors des essais en bacs, l'eau de lessivage a été

collectée et analysée. La quantité d'azote lessivé était de manière générale très faible dans les quatre sols testés. Ceci même dans la variante sur-fertilisée avec le digestat liquide. Dans la majorité des cas, la quantité d'azote lessivé était inférieure à 0,5% de l'azote fertilisé. Seul dans une des terres, la quantité d'azote lessivé était légèrement supérieure, arrivant à 2,2% de l'azote fertilisé dans la modalité avec l'engrais du commerce. On peut donc conclure que les risques de lessivage suite à l'emploi de digestat liquide sont négligeables. Ceci particulièrement pour les cultures couvertes de par l'irrigation bien contrôlée dans ces systèmes.

L'évaluation des risques de volatilisation d'ammoniac, testés en laboratoire, montre clairement que plus la dose de fertilisant apporté est importante, plus la quantité d'ammoniac volatilisé est importante. Toutefois, à dose égale, la volatilisation d'azote n'était pas supérieure dans les modalités avec le digestat liquide en comparaison avec les engrais du commerce ou avec l'urée. Il est intéressant de noter que la quantité d'azote volatilisé dépende fortement du type de sol. La dose relativement importante d'azote volatilisé dans la terre maraîchère lorsque la quantité de digestat liquide apporté était importante (jusqu'à 35% de l'azote total fertilisé) montre qu'il faut favoriser plusieurs apports modérés de digestat plutôt que peu d'apports plus importants.

La physique du sol, à savoir la capacité de rétention en eau et la stabilité des agrégats n'a pas été influencée négativement par les apports raisonnés de digestat liquide dans tous les sols testés, et ceci à court ou à moyen terme. Dans les divers types de sols. Soit ces caractéristiques étaient semblables entre les différentes modalités, soit elles étaient légèrement améliorées. Toutefois, cet effet bénéfique, par exemple sur la stabilité des agrégats de sol dans la terre maraîchère, diminue avec une sur-fertilisation de digestat liquide. Ceci indique que, lorsque l'on emploie ce produit, il faut, comme pour ce qui est pour la volatilisation de l'azote, plusieurs apports modérés de digestat plutôt que peu d'apports plus importants.

En ce qui concerne les caractéristiques chimiques des sols, le digestat liquide ne s'est guère différencié des engrais du commerce. A l'exception d'une augmentation du phosphore et de la potasse soluble après l'apport de digestat liquide à haute dose. Ce point est important pour le praticien et démontre qu'il doit, lors de ses calculs de fumures, bien tenir compte de l'apport de phosphore lié à la fertilisation basée sur le digestat liquide. Une augmentation de la salinité dans les sols suite à l'utilisation de digestat liquide n'a pas été observée lors des essais ; ceci permet de rassurer les producteurs dont ce point représentait une crainte pour les cultures couvertes.

Les caractéristiques biologiques des sols, aucune influence n'a été observée entre le digestat liquide et les engrais du commerce au niveau de l'activité FDA (mesure pour l'activité microbiologique globale du sol). De même, le digestat liquide ne semble guère influencer significativement la réceptivité des sols aux maladies telluriques ; tendanciellement, il semble diminué la réceptivité des sols à *Pythium ultimum* et à augmenter légèrement celle à *Rhizoctonia solani*. Toutefois, ceci est à interpréter avec beaucoup de prudence, la variabilité des résultats étant importants.

5. Recommandations pour la pratique

Le digestat liquide représente un engrais très intéressant pour le maraîchage, en particulier, vu le prix élevé des engrais organiques du commerce, pour le maraîchage bio. Toutefois, certains points doivent être respectés pour que son utilisation soit couronnée de succès.

Tout d'abord, il faut considérer que, pour les producteurs bio, la distance de transport maximum utilisée pour le digestat liquide est de 20 km à vol d'oiseau. Ne peuvent donc être prises en compte que les installations de méthanisation comprises dans ce périmètre.

La première chose à faire alors est un bilan de fumure clair pour définir les quantités de digestat liquide utilisée. Pour ce bilan de fumure, il faut absolument tenir compte des analyses du digestat liquide en question, car les valeurs fertilisantes peuvent fortement varier entre deux installations, suivant les intrants traités.

Le deuxième point à définir est la technique d'épandage du digestat liquide : soit par tuyaux semi-manuellement, soit par fertigation. Dans ce dernier cas, choisir absolument un digestat liquide traité par centrifugation ou pré-filtré ne contenant plus de sable. Au niveau technique, choisir des goutteurs appropriés (type UniRam ou type NetaFim) avec un préfiltre dans le système pour éviter tout colmatage des goutteurs. Pour diminuer les travaux de maintenance au niveau de la fertigation avec le digestat liquide, un système de filtre autonettoyant pourrait être conseiller ; un tel système doit toutefois encore être testé dans les conditions de la pratique.

Pour optimiser l'efficacité du digestat, il faut fractionner les apports. Avec un système de fertigation, un apport hebdomadaire est à conseiller. Lors d'apport manuel, un apport tous les quinze jours pourraient être optimal. En plein champ, 2 ou 3 apports pendant la culture sont à recommander (suivant la culture et sa durée).

Comme le montre l'étude de Fuchs et al. (2014¹), il faut, pour des raisons hygiéniques, n'utiliser que du digestat liquide provenant de systèmes thermophiles (comme celui provenant d'installations thermophiles de type Kompogas) pour les cultures consommées crues (comme les salades). Les digestats provenant d'installations mésophiles ne sont pas appropriés pour ces cultures.

6. Conclusions

L'emploi de digestat liquide en maraîchage bio est donc possible et représente même une pratique sensée du point de vue aussi bien économique qu'environnemental. En effet, cela permet de fermer les cycles de matière de manière optimale en recyclant les restes organiques de la société. Ceci évidemment si la qualité du digestat est irréprochable ; ce dernier point est le rôle du producteur du digestat. Du point de vue économique, le digestat liquide est intéressant car, malgré les investissements techniques nécessaires à son utilisation, son coût d'achat est très faible en comparaison des engrais bio du commerce.

Employé de manière correcte, comme celle indiquée dans ce présent projet, le digestat liquide n'a montré aucun effet négatif sur la fertilité du sol, la santé des plantes et l'environnement.

¹ Fuchs, J.G., Baier, U., Berner, A., Philipp, W., Schleiss, K., 2014. Abschätzung des hygienischen Risikos im Zusammenhang mit der Anwendung von flüssigem Gärgut in der Schweiz. Schlussbericht des Forschungsprojektes im Auftrag vom BFE, BLW, BAFU und BVET, 23 pp.

Ainsi, suite à ce projet, nous pouvons recommander l'emploi de ce produit en maraîchage. Ceci est vrai aussi bien pour le maraîchage bio que pour le maraîchage conventionnel. Pour ce dernier, il faut toutefois noter que l'avantage financier est moindre, les coûts pour les engrais minéraux étant nettement inférieurs aux engrais bio.

7. Remerciements

Nous tenons à remercier l'OFAG pour le financement du projet.

Nous remercions également les entreprises de maraîchage «Gerber Biogreens» à Fehraltorf (ZH) et Tännlihof (famille Höneisen) à Andelfingen (ZH).

Enfin, nous remercions également les entreprises de méthanisation Leureko AG, EcoBois Recyclage SA et AXPO Biomasse pour la mise à disposition du digestat liquide.

Frick, 2020