



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de biologie



Développement d'une technique de production du safran cultivé sous conditions climatiques québécoises

Line Lapointe, Marie-Pier Denis et Mohamed Amine Ayari
Département de biologie et Centre d'étude de la forêt, Université Laval,
Québec, QC.

Projet financé par le programme Innov'Action Agroalimentaire du MAPAQ ainsi que par Gestion et Environnement GD.

OBJECTIFS

L'objectif de ce projet est de développer une technique de production du safran cultivé sous les conditions agronomiques et climatiques du Québec. Nous voulons vérifier l'effet des facteurs suivants sur le rendement en safran et le taux de propagation des plants : 1) profondeur et période de plantation, 2) ajout de mycorhizes et fertilisation, 3) contrôle des adventices.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Toutes les expériences ont eu lieu à Baie-Saint-Paul, dans la région de Charlevoix, sur les terrains appartenant au partenaire industriel. Le champ utilisé pour les essais de culture est situé en pente (orientation nord-est) et le sol est un loam sablonneux (pH : 5,6, matière organique : 5,8 %, P : 52 kg/ha, K : 34 kg/ha, Ca : 298 kg/ha, Mg : 22 kg/ha, P/Al : 1,4). Il a été non cultivé jusqu'au mois d'août 2016. Pour toutes les expériences, le sol a été travaillé à une profondeur d'au moins 30 cm afin d'obtenir un sol bien meuble (Kumar, et al.) et les cornes ont été plantés puis recouvert d'un buton afin d'assurer un bon drainage. La plantation a eu lieu vers la mi-août (sauf pour l'expérience Période de plantation), à une profondeur de 25 cm à partir de la surface du buton (sauf pour l'expérience Profondeur de plantation) et a été effectuée manuellement. Pour toutes les expériences (sauf Période de plantation), les cornes ont été importés d'Europe et étaient certifiés biologiques. Pour l'expérience Période de plantation, les cornes ont été achetés auprès de Pur Safran (25,

rang de la Chapelle, Ste-Christine d'Auvergne, Québec, Canada, G0A 1A0), afin de les obtenir plus tôt en saison et pouvoir ainsi les planter dès la fin juillet.

VOLET 1 : Profondeur et période de plantation

Expérience A : Profondeur

Des cormes de safran avaient déjà été plantés à différentes profondeurs afin d'identifier la profondeur optimale pour maximiser le rendement en safran. Les parcelles ont été mises en place à la mi-août 2016 par le partenaire. La dimension des parcelles est de 195 cm x 105 cm (2 m²). Chaque parcelle contient 40 cormes plantés en 4 rangs. L'espacement entre les rangs et entre les cormes à l'intérieur d'un même rang est de 15 cm (densité moyenne de 20 cormes m² en tenant compte de l'espacement entre les parcelles). Le dispositif contient trois traitements : cormes plantés à une profondeur de 20 cm, 25 cm ou 30 cm, répétés huit fois. Puisque le dispositif est situé dans une pente, quatre blocs suivant le gradient de la pente ont été créés à raison de deux répétitions de chaque traitement par bloc, pour un total de 24 parcelles (960 cormes).

De nouvelles parcelles ont été mises en place en août 2018 pour deux raisons. La première concerne l'emplacement des parcelles initiales qui sont ombragées par la forêt en début de journée l'automne, c.-à-d. au moment de l'émergence et de la floraison. Nous avons choisi un emplacement plus éloigné de la bordure de la forêt pour s'assurer que les parcelles soient pleinement exposées au soleil pendant toute la journée. De plus, nous avons voulu tester de plus faibles profondeurs puisque la neige s'installe tôt à l'automne, limitant les risques de gels des cormes durant l'hiver. Nous avons donc installé de nouvelles parcelles de mêmes dimensions que les précédentes pour tester la plantation à 10, 15 et 20 et 25 cm de la surface du buton. Chaque traitement était répété une fois par bloc dans 6 blocs pour un total de 24 parcelles (960 cormes).

Expérience B : Période de plantation

Des cormes ont été plantés à différentes périodes de l'été et la plantation a été répétée deux années de suite. Les parcelles ont été mises en place au cours des étés 2017 et 2018. Les parcelles de 2 m² contenaient chacune 40 cormes sous les mêmes densités de plantation que pour l'expérience 1A. Les traitements sont les 4 périodes de plantation (mi-juillet, début août, mi-août, début septembre) et les deux années de plantation constituent les blocs. Les parcelles sont placées de façon aléatoire à mi-pente pour ne pas confondre l'effet année de l'effet pente. Il y a 4 répétitions par traitement par bloc, pour un total de 32 parcelles (1280 cormes).

VOLET 2 : Fertilisation, ajout de mycorhizes et ajout de biostimulants

Les effets d'une fertilisation biologique, de l'ajout de mycorhizes et de l'ajout de biostimulants appliqués lors de l'implantation ont été testés séparément et en interaction et comparés à un témoin sans fertilisation, mycorhizes, ni biostimulants. La dose proposée pour le fertilisant biologique est la même que celle utilisée dans une expérience en cours

portant sur le safran et réalisée par le MAPAQ en Mauricie dans le cadre d'un programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région. La comparaison des deux dispositifs devait permettre d'élargir les conclusions de l'expérience. Il est possible que le simple ajout de mycorhizes et/ou de biostimulants suffise à combler les faibles besoins nutritionnels du safran en aidant à développer la microflore, comme le suggère le fait que des expériences en chambres de croissance testant plusieurs substrats différents ont eu peu ou pas d'effet sur la croissance du safran et son rendement (L. Lapointe, données non publiées). Les champignons mycorhiziens sélectionnés sont du genre *Glomus* comme ceux utilisés dans les expériences antérieures réalisées sur le safran (Aimo, et al. 2010). Pour les biostimulants, les deux produits retenus sont facilement disponibles au Québec et l'un d'eux (EarthAlive Soil Activator) contient entre autres des micro-organismes du genre *Pseudomonas* comme ceux utilisés par Aimo et collaborateurs (2010).

Une expérience factorielle en blocs aléatoires complets a permis de tester les trois facteurs suivants : 1) fertilisation biologique à l'implantation ou aucune fertilisation, 2) ajout de mycorhizes ou aucun ajout de mycorhizes et 3) ajout de Turitek, ajout de l'activateur de sol EarthAlive ou aucun ajout de biostimulant. Les fertilisants testés contiennent de la farine de plume (13-0-0) à une dose de 462 kg/ha, de la poudre d'os (0-13-0) à une dose de 1538 kg/ha, et du Sul-Po-Mag (0-0-22) à une dose de 1136 kg/ha. Ils ont été mélangés au sol à la profondeur de plantation afin que les racines aient accès rapidement aux fertilisants. Les cormes ont ensuite été recouvertes de sol pour former des butons. Les mycorhizes testées sont un produit commercial, MykePro Gazon contenant 15 spores viables/g de *Glomus intraradices*. Les mycorhizes ont été appliquées à raison de 20 g/corme (300 spores/corme), et les granules ont été posés sur le substrat sous le corme au moment de la plantation. Le Turitek est un biostimulant québécois. Nous avons fait tremper les cormes dans une solution de 1,5 % v/v Turitek/eau pendant 4 heures, suivi de deux arrosages de 5000 L/ha de solution 0,06 % à un intervalle de deux semaines suite à la plantation. L'activateur de sol EarthAlive est un biostimulant contenant des *Pseudomonas*. Il a été ajouté à raison de 26 ml par corme (5200 L/ha) d'une solution de 2,5 g/L, appliquée lors de l'implantation autour de chacun des cormes (avant la formation des butons). Les parcelles de 2 m² ont été mises en place à la mi-août 2017 et contiennent chacune 40 cormes sous les mêmes densités de plantation que pour l'expérience du volet 1A. Les 12 traitements ont été répétés dans 4 blocs disposés le long de la pente, pour un total de 48 parcelles (1920 cormes).

VOLET 3 : Contrôle des plantes adventices par compagnonnage ou paillis

Pour le moment, les producteurs et productrices de safran québécois contrôlent les plantes adventices en désherbant manuellement ou en effectuant un pyrodésherbage au besoin. Puisque la majorité des producteurs et productrices d'ici désirent une production biologique, aucun herbicide n'a été testé dans le cadre de ce projet.

Nous avons testé différentes techniques de contrôle des plantes adventices : désherbage manuel (témoin), pyrodésherbage (à l'aide d'un désherbeur thermique), ajout de paillis de bois raméal fragmenté et compagnonnage du safran avec l'oignon égyptien ou la capucine.

Les parcelles de 4,4 m² contiennent chacune 100 cornes plantés en 4 rangs. L'espace entre les rangs et entre les cornes à l'intérieur d'un même rang est de 15 cm (densité de 23 cornes/m²). Dans les parcelles de compagnonnage, 39 plants de l'espèce compagne ont été plantés entre les cornes. Dans les parcelles avec paillis, une couche de 5 cm de paillis a été ajoutée sur les butons immédiatement après la plantation. À chaque automne et à chaque printemps, l'épaisseur de paillis a été réajustée au besoin de façon à conserver 5 cm d'épaisseur en tout temps. Le dispositif a été séparé en 3 blocs disposés le long de la pente. Chaque traitement a été répété 2 fois par bloc, pour un total de 30 parcelles (3000 cornes, 234 bulbilles d'oignon égyptien, 234 graines de capucine). L'oignon égyptien a été planté à partir de bulbilles en août 2017 en même temps que le safran alors que la capucine a été semée directement dans le sol à une profondeur de 1,5 cm au début du mois de juin 2018.

VOLET 4 : Orientation du corne lors de la plantation

Nous avons aussi mis en place une expérience pour tester l'effet de l'orientation du corne lors de la plantation sur sa vitesse et son taux d'émergence. Les traitements étaient les suivants : cornes orientés à 0° (position recommandée); cornes orientés à 45°; cornes orientés à 90°; cornes orientés à 135° et cornes orientés à 180° par rapport à la verticale pointant vers la surface du sol. Les traitements sont répartis en deux blocs, avec deux répétitions par bloc pour un total de 4 répétitions par traitement. Chaque parcelle contient 5 cornes, totalisant 100 cornes pour l'expérience.

VOLET 5 : Suivi de l'induction florale

Cette expérience avait pour but d'identifier le moment de l'initiation de la floraison durant l'été et ainsi pouvoir identifier à quel moment la température estivale agit sur l'induction florale. Nous avons récolté aléatoirement des cornes d'une parcelle qui n'a subi aucun traitement (témoin) et nous les avons coupés en deux verticalement afin de pouvoir observer le développement des bourgeons feuillés et floraux. La récolte des cornes a été effectuée aux deux semaines à partir de la mi-mai 2018, puis aux semaines durant l'été pour un total de 12 semaines. À chaque récolte, trois cornes ont été prélevés au hasard en évitant les bordures des parcelles. Après avoir pesé et coupé en deux les cornes, une coloration à l'aide de bleu de méthylène a été appliquée pour mieux discerner les différentes structures sous une loupe binoculaire.

Entretien des parcelles

Pour toutes les expériences sauf celles portant sur le contrôle des plantes adventices, un désherbage a été effectué manuellement au besoin chaque semaine ou à l'aide d'un désherbeur thermique pendant la période de dormance du safran. Le temps alloué au désherbage pour chaque parcelle a été noté pour toutes les expériences. Aucun arrosage, ni fertilisation n'a été effectué, mise à part la fertilisation appliquée au moment de la plantation dans le volet 2.

Mesures, récoltes et suivi

Chaque automne (2017 et 2018), dans chacun des dispositifs expérimentaux, l'émergence du feuillage a été notée une à deux fois par semaine. L'émergence finale qui comprend à la fois les plants qui ont émergé à l'automne, ceux qui ont émergé durant l'hiver sous la

neige moins ceux qui n'ont pas survécu à l'hiver a ensuite été mesurée le printemps suivant (2018 et 2019). Le décompte et la récolte des fleurs ont été faits quotidiennement pendant la floraison. Les stigmates ont ensuite été retirés des fleurs et séchés immédiatement (20 minutes à 42 °C en milieu ventilé, ou jusqu'à ce que le contenu en eau ait diminué de 80-90 %; Carmona et Alonso 2004). Le safran a ensuite été pesé. Durant l'été, les fleurs de capucine ont été récoltées 2 fois par semaine et pesées. Les bulbilles aériens d'oignon égyptien ont été récoltés à la mi-septembre et pesés.

En fin mai, pendant le stade végétatif, 2 à 3 racines de 3 cornes par parcelle du volet 2 ont été récoltées afin de faire le suivi des taux de mycorhization, selon la méthode décrite dans Trouvelot et collaborateurs (1986).

La sénescence a été estimée dans chacune des parcelles de façon hebdomadaire entre le 6 juillet et le 30 juillet 2018, en utilisant des classes de pourcentage (Tableau 1).

Tableau 1 Description des classes utilisées pour le suivi de la sénescence des feuilles dans les parcelles.

<u>Classe</u>	<u>% du feuillage senescé</u>
1	0
2]0-25]
3]25-50]
4]50-75]
5]75-90]
6]90-100[
7	100

Après la sénescence totale des plants (vers le début juillet), 5 cornes par parcelle ont été déterrés pour prendre des mesures de biomasse : masse fraîche du corne principal et des cornes fils de l'ensemble des cornes et leur dénombrement. Ces mesures ont été prises dans chaque parcelle du volet 1A (profondeur) en 2017 et des expériences Fertilisations (volet 2) et Moment de plantation (volet 1B) en 2018.

Un suivi de la température du sol a été effectué dans les parcelles de l'expérience Profondeur de plantation (volet 1A). Dans chaque parcelle, une sonde (Termochron 4K, 1221 Innovation Drive, Suite #117, Whitewater, WI 53190, USA) enregistrait la température en continu à 20 cm, 25 cm ou 30 cm de profondeur selon le traitement, à partir de l'automne 2016 jusqu'à la fin de l'expérience en 2018. De nouvelles sondes ont été ajoutées dans les parcelles plantées à 10, 15, 20 et 25 cm, à l'été 2018.

Analyses de sol

Des échantillons de sol (macro- et oligo-éléments, matière organique, pH, CEC et saturation en bases) ont été récoltés au moment de la plantation pour chacune des expériences, et ce, avant l'ajout de fertilisants, mycorhizes ou biostimulants. Un échantillon a été récolté au centre de chacune des parcelles à la profondeur de plantation de chaque parcelle puis tous les échantillons d'un même bloc ont été mélangés pour former un échantillon composite par bloc par expérience.

Analyses de fertilisants

Pour le volet 2, l'analyse de tous les fertilisants utilisés a été faite avant la plantation (macro- et oligo-éléments) : farine de plume, poudre d'os, Sul-Po-Mag et biostimulants. Les quantités à ajouter par parcelle ont ensuite été calculées pour obtenir les doses attendues.

Analyses de cormes

Les cormes issus du volet 2 Fertilisation, ajout de mycorhizes et ajout de biostimulants ont été analysés. Les cormes récoltés et lyophilisés (5 cormes/parcelle, 48 parcelles) ont été broyés à l'aide d'un broyeur ultra-centrifuge. Les cormes broyés ont ensuite été digérés dans un mélange de peroxyde et d'acide sulfurique. La teneur en azote et en phosphore a été par la suite quantifiée par colorimétrie alors que le potassium, le calcium et le magnésium ont été dosés par absorption atomique.

Le même type d'analyses de nutriments a été réalisé sur des cormes issus de l'expérience de fertilisation réalisée par la MAPAQ en Mauricie afin de comparer les effets de leur expérience (application d'azote sous forme d'engrais organique à différentes périodes comparées à un témoin non fertilisé) avec ceux de notre expérience. Les cormes ont été prélevés à la ferme La poule aux champs à Sainte-Flore en Mauricie, le 5 juillet 2017 et le 3 juillet 2018, après la sénescence du feuillage. Cinq cormes ont été prélevés dans chacune des parcelles de l'expérience de fertilisation, pour un total de 75 cormes par année (15 parcelles, 3 réplicats par traitement x 5 traitements). La plupart des cormes récoltés en 2018 présentaient des moisissures visibles après le retrait de leur enveloppe, ce qui réduit la taille des échantillons. Les échantillons ont donc été groupés par traitement et analysés sans vérifier l'effet des blocs pour l'année 2018. Voici la description des traitements de l'expérience mise sur pied par le MAPAQ en 2015 : T0 : aucune fertilisation; T1 : 60 unités N à l'implantation + P et K; T2 : 60 unités N au printemps + P et K; T3 : 30 unités N à l'implantation et 30 unités N au printemps + P et K; T4 : 0 unité N + P et K. Dans tous les traitements qui en contiennent, le P et le K ont été ajoutés en août 2016, avant l'implantation des cormes. Soixante unités d'N correspondent à un ajout de 461,5 kg ha⁻¹ de farine de plume (13-0-0), alors que 30 unités d'N correspondent à 230,7 kg ha⁻¹ de farine de plume. Le phosphore a été apporté avec de la poudre d'os (0-13-0) à raison de 1538,5 kg ha⁻¹ et le potassium avec du Sulpomag (0-0-22-11) à raison de 1136 kg ha⁻¹.

Analyses statistiques

Chacune des expériences a été analysée de façon indépendante. Pour toutes les expériences, un modèle linéaire général a été utilisé. La majorité des expériences ont été mises en place à l'été 2017. Il était prévu d'analyser les données des automnes 2017 et 2018 selon un

dispositif factoriel à mesures répétées. Cependant, comme les plants ont peu émergé et qu'il n'y a pas eu de fleurs en 2018, les analyses ont été réalisées uniquement sur les données de l'automne 2017 (émergence automnale, floraison) et du printemps 2018 (émergence finale, masse des cormes, analyses des nutriments, date de sénescence), à l'exception de l'expérience Période de plantation où les années constituent les véritables répétitions (blocs). Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistix.

Volet 1 - Expérience A (Profondeur de plantation) : L'émergence automnale et printanière, le nombre de fleurs, la masse fraîche et sèche de safran et la masse sèche des cormes ont été comparés entre les traitements à l'aide d'une ANOVA à 2 facteurs fixes : profondeur de plantation (20, 25 et 30 cm) et blocs (4 blocs). Les taux d'émergence à l'automne 2018 pour les profondeurs de plantation 10, 15, 20 et 25 cm ont été analysés à l'aide d'une ANOVA à 2 facteurs fixes : profondeur de plantation ((4 niveaux) et blocs (6 blocs). Les températures du sol durant l'été ont été comparées avec le même modèle statistique, à partir de la moyenne des températures journalières dans chaque parcelle durant les mois d'été (juillet et août; donc une donnée moyenne par parcelle pour l'été).

Expérience B (Période de plantation) : Les taux d'émergence automnale et l'émergence le printemps suivant ont été comparés entre les traitements à l'aide d'une ANOVA à 2 facteurs fixes : période de plantation (4 périodes de plantation) et année (qui sert ici de bloc). Le nombre de fleurs, et la masse fraîche et sèche de safran produits à l'automne 2017 ont été comparés entre les traitements à l'aide d'une ANOVA à un facteur (période de plantation). Les taux d'émergence durant l'automne à chacune des dates d'observation ont été analysés séparément pour les deux années, puisque les dates d'observation varient entre les deux années.

Volet 2 - Fertilisation, ajout de mycorhizes et ajout de biostimulants: L'émergence automnale, l'émergence finale, le nombre de fleurs, la masse fraîche et sèche de safran, les taux de mycorhization, la masse fraîche et sèche des cormes ainsi que la teneur en nutriments des cormes ont été comparés entre les traitements à l'aide d'une ANOVA à 4 facteurs fixes : fertilisation biologique (2 traitements), mycorhizes (2 traitements), biostimulants (3 traitements), blocs (4 blocs).

Volet 3 - Contrôle des adventices : L'émergence automnale, le nombre de fleurs, la masse fraîche et sèche de safran et l'émergence finale au printemps suivant ont été comparés entre les traitements à l'aide d'une ANOVA à 2 facteurs fixes : type de contrôle (5 traitements) et blocs (3 blocs). Les températures du sol durant l'été ont été comparées avec le même modèle statistique, à partir des températures moyennes dans chaque parcelle durant l'été, de même que le temps cumulé de désherbage des parcelles.

Orientation du corne lors de la plantation: L'émergence automnale, le nombre de fleurs, la masse fraîche et sèche de safran et l'émergence finale le printemps suivant ont été comparés entre les traitements à l'aide d'une ANOVA à 2 facteurs fixes : orientation (5 traitements) et blocs (2 blocs). Cette analyse a été effectuée séparément pour les données de la saison 2017-2018 et pour ceux de la saison 2018-2019.

Analyses de coûts

Pour les volets 2 et 3 Fertilisation et Contrôle des adventices, une analyse des coûts selon le type de fertilisation ou le type de contrôle devait être réalisée. Cependant, la production très limitée de safran ne permet pas de comparer ces différentes méthodes de culture puisque nous n'avons pas pu estimer leur impact sur les rendements en safran.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

VOLET 1 : Profondeur et période de plantation

Expérience A : Profondeur

Profondeurs 20, 25 et 30 cm

L'une des grandes contraintes d'un bon rendement du safran au Québec est la température du sol pendant la période de dormance (juin-août). C'est au cours de cette période que l'induction de la floraison a lieu au sein du corme, et selon Molina et al (2005), la température optimale pour favoriser la production de fleurs se situe entre 23 °C et 27 °C pour une période minimale de 50 jours.

Des chercheurs ont testé plusieurs profondeurs allant de 15 à 25 cm. La profondeur optimale, en Inde, est de 20 cm (Alam 2007). La raison pour planter les cormes et les bulbes à ces profondeurs est due au fait que ces cultures demeurent souvent en place pendant plusieurs années. Les nouveaux cormes se développent sur l'ancien corme ce qui fait que les cormes se rapprochent de la surface du sol avec le temps. D'autre part, les cormes ou bulbes qui se trouvent en surface tendent à se diviser davantage et donc à produire des plants plus nombreux, mais plus petits (Arslan, et al. 2007) qui souvent ne fleurissent pas ce qui est évidemment non souhaité pour la culture du safran. En Iran, la plantation se fait à une profondeur de 10 cm (Galavi, et al. 2008). Ces auteurs ont testé trois profondeurs de plantations allant de 10 à 20 cm et ont montré que le taux de division des cormes, le nombre des racines et le nombre des feuilles diminuent avec la profondeur de plantation. La date d'émergence des fleurs et des feuilles sont également retardées chez les cormes plantés plus profondément. En contrepartie, en plantant plus profondément, la longueur des feuilles, le nombre de fleurs et la quantité de safran produit augmentent. La particularité qui caractérise la profondeur de 15 cm est qu'elle a donné plus de fleurs et un poids plus important des cormes que les deux autres profondeurs testées (10 et 20 cm) (Galavi, et al. 2008). Le sol se réchauffe lentement au Québec ce qui limite la durée d'exposition des cormes à des températures élevées durant l'été. Pour cette raison et pour bien caractériser et identifier l'effet de la température sur le rendement en safran, des sondes ibuttons ont été installées à la profondeur de plantation. Les données de 2017 nous indiquent que le sol se réchauffe davantage en surface durant l'été, comme attendu (figure 1).

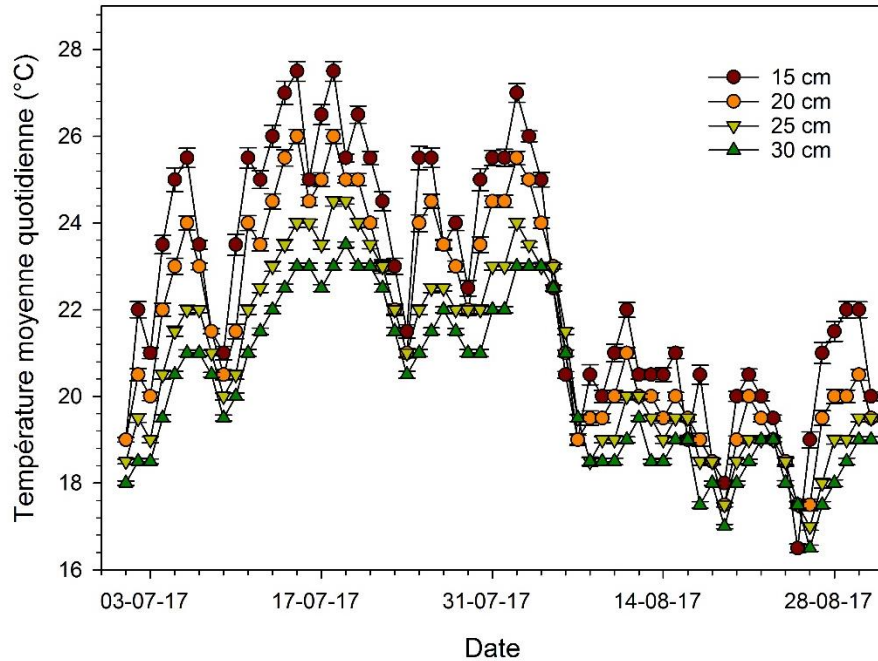


Figure 1 : Température moyenne quotidienne du sol (moyenne \pm erreur type), entre le 1^{er} juillet et le 31 août 2017 selon la profondeur de la prise de données (15 cm, 20 cm, 25 cm ou 30 cm). n = 8.

Entre les deux années, on note des différences importantes (figure 2). L'année 2018 est caractérisée par des températures du sol plus élevées de juillet à août, alors que le mois de juin a été moins chaud que celui de 2017 ce qui a sans doute retardé l'entrée en sénescence des plantes (voir données sur la sénescence : deux semaines de décalage par rapport à 2017). Il est important de noter que la température a chuté considérablement au mois de septembre et octobre en 2018 ce qui pourrait expliquer l'absence de fleurs dans tous les traitements. De plus, la chute précoce de neige à Baie-St-Paul a probablement aussi limité les taux d'émergence surtout dans les parcelles mises en place en 2017. D'ailleurs, les premières chutes de neige ont été enregistrées 3 semaines plus tôt en 2018 qu'en 2017 ou 2016 (données non présentées).

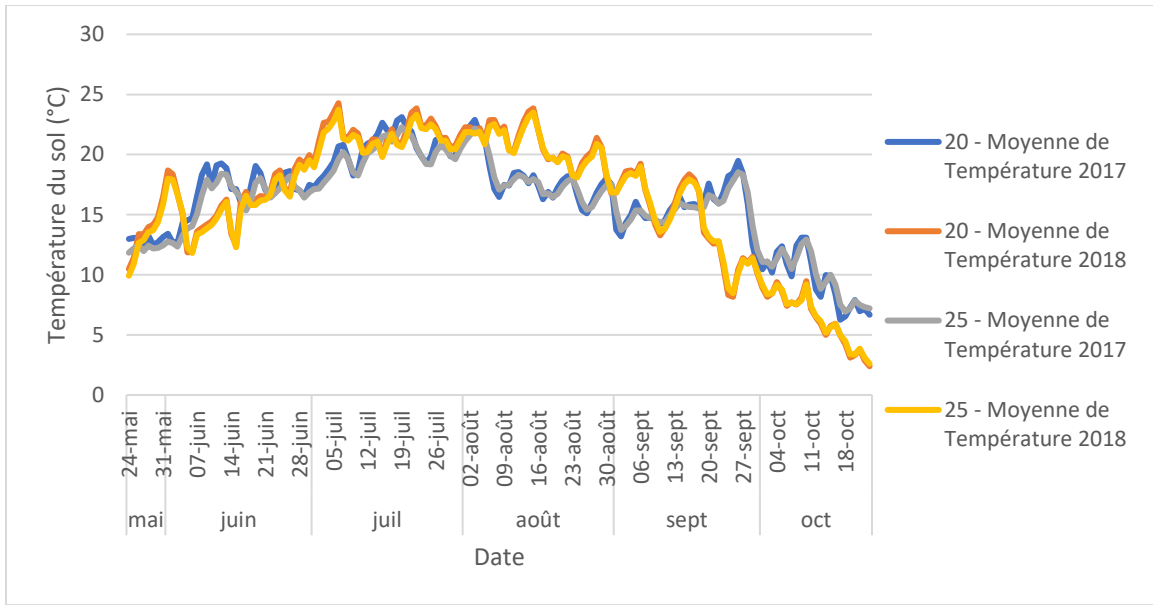


Figure 2: Températures moyennes quotidiennes du sol mesurées à 20 et 25 cm de profondeur de mai à octobre en 2017 et 2018. n = 8.

À l'automne 2016, la profondeur de plantation a eu un effet significatif sur l'émergence des cornes (figure 3). Au moment du dernier relevé (23 novembre 2016), le nombre de cornes émergés par parcelle était inversement proportionnel à la profondeur de plantation des cornes (20 cm : 91 %, 25 cm : 75 %, 30 cm : 35 %). À l'automne 2017, les taux d'émergence avant l'arrivée d'un couvert permanent de neige ont été très faibles et ne différaient pas significativement d'un traitement à l'autre.

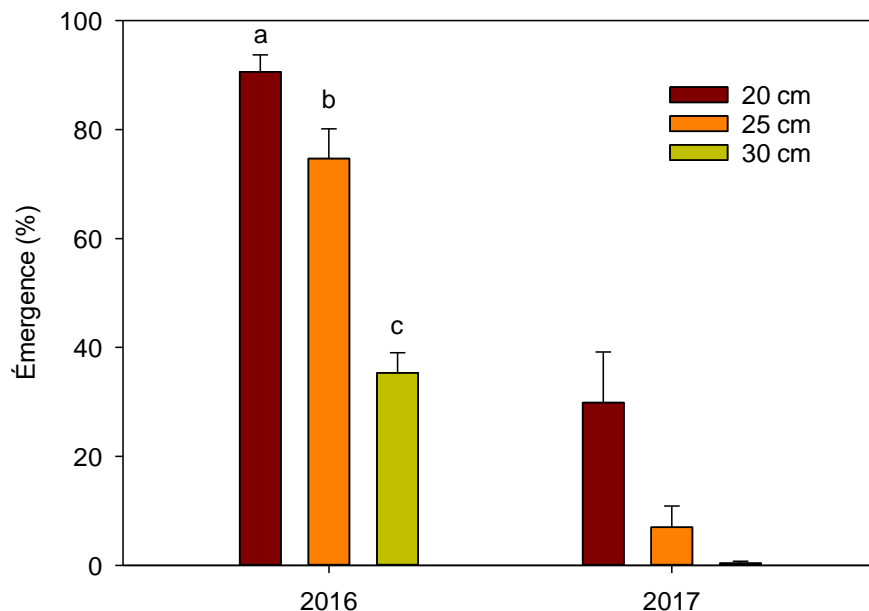


Figure 3: Taux d'émergence des feuilles à l'automne (moyenne \pm erreur type) en 2016 et 2017 des cormes plantés en 2016 selon la profondeur de plantation (20 cm, 25 cm ou 30 cm). n = 8.

L'émergence finale (survie) à la fin de la première saison de croissance au printemps 2017 (29 mai, environ un mois avant la sénescence) était significativement plus élevée dans les traitements 20 cm et 25 cm (99,4 %) que dans le traitement 30 cm (93 %). Il n'y a pas eu assez de fleurs dans ces parcelles en 2016 et 2017 pour pouvoir analyser les données (taux de floraison moyen de 2,5 % et 0,8 %, respectivement). Nous croyons que l'emplacement de cette expérience n'est pas assez ensoleillé (situé trop près de la forêt ce qui réduit le nombre d'heures d'ensoleillement surtout à l'automne), ce qui expliquerait la floraison peu abondante ainsi que l'émergence tardive observée à l'automne 2017 (figure 3). De plus, le sol demeure humide même en été (obs. pers.)

La masse moyenne des cormes récoltés aléatoirement parmi ceux qui avaient produit 2 à 3 faisceaux de feuilles par corne diffère selon le traitement. En effet, la masse moyenne des cormes du traitement 20 cm est significativement plus élevée que pour les cormes du traitement 30 cm (poids frais : 6,6 g et 4,3 g, respectivement) ce qui suggère qu'une émergence tardive nuit à l'accumulation de réserves dans le corne, qui ne peut être compensée le printemps suivant.

La sénescence s'est établie de façon plutôt synchrone entre les traitements au début de l'été 2018 (figure 4), et ce même si les plants établis plus profondément avaient émergé un peu plus tard l'automne précédent (figure 3).

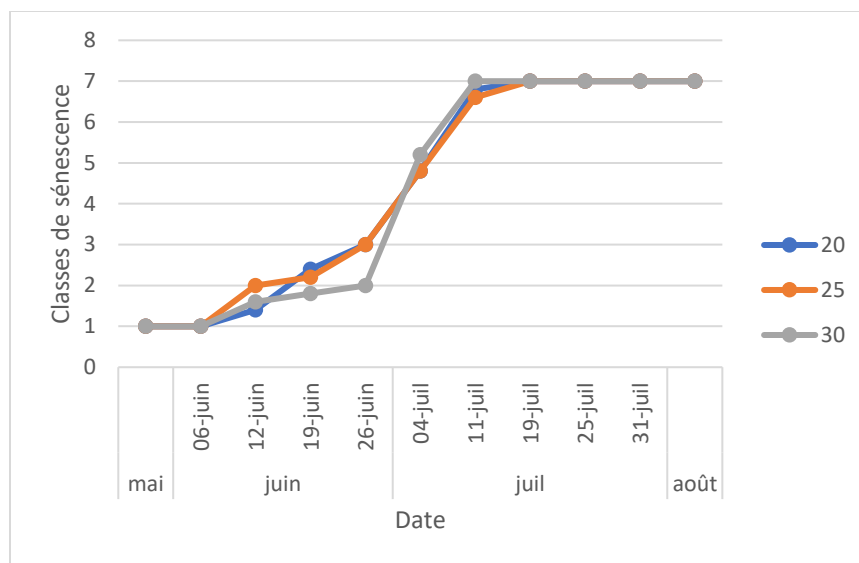


Figure 4: Évolution de la sénescence du feuillage à l'été 2018 pour les cormes plantés en 2016 selon les différentes profondeurs (20, 25 ou 30 cm). Les classes de sénescence sont présentées au tableau 1.

Rapport phytosanitaire

Au printemps 2018, étant donné les très faibles taux d'émergence, nous avons déterré des cormes et constaté des problèmes de pourriture. Des tests d'isolement fongique effectués au Le Laboratoire d'expertise et de diagnostic en phytoprotection du MAPAQ n'ont pas été concluants. Ils ont montré que les cormes en dépérissement étaient infectées de nombreux champignons, bactéries et nématodes qui ne sont pas pathogènes et qui se nourrissent des champignons présents dans les cormes en décomposition. Nous croyons que la pourriture n'est pas due à des pathogènes, mais plutôt à l'emplacement de ces parcelles. En effet, elles sont situées à proximité de la bordure forestière, ce qui crée de l'ombre sur les parcelles en début de journée durant l'automne. Cet effet n'était pas visible durant l'été au moment où les parcelles ont été mises en place, d'autant plus qu'elles sont situées à plusieurs mètres de la bordure forestière. Les plants reçoivent donc moins de lumière chaque jour durant l'automne et le sol se refroidit plus rapidement. Une mortalité importante a été constatée au printemps 2018. En effet, l'émergence finale (printanière) en 2018 était de 24,3 % ($\pm 8,0$ %) pour l'ensemble des traitements de cette expérience. Il semble donc que la faible émergence observée à l'automne 2017 (figure 3) reflète non seulement un retard dans l'émergence, mais possiblement aussi une certaine mortalité durant l'été 2017. Cette mortalité était davantage concentrée sur l'un des butons. Mais il est également possible que la mortalité ait eu lieu principalement durant l'hiver 2017-2018. En éliminant ce buton, la moyenne de survie au printemps 2018 augmente à 36,4 % ($\pm 6,2$ %).

En mai 2018, nous avons pris la décision d'installer de nouvelles parcelles situées plus loin de la bordure forestière. Ces parcelles ont été mises en place à l'été 2018. Cette nouvelle expérience comprend des profondeurs différentes de celles testées en 2016, soit 10, 15, 20

et 25 cm. De plus, les parcelles sont établies sur une pente plus forte ce qui entraîne un meilleur drainage.

Profondeur 10, 15, 20 et 25 cm

Tout comme pour les plantations effectuées en 2016, l'émergence à l'automne diminue de façon importante avec la profondeur de plantation (figure 5). Les cormes plantés à 10 cm émergent une semaine plus tôt que ceux plantés à 15 cm ou plus. On note un écart considérable entre le taux d'émergence à 15 et à 20 cm. Ces résultats concordent parfaitement avec les résultats de 2016 (figure 3). Les profondeurs 10 et 15 cm semblent intéressantes pour assurer une émergence hâtive à l'automne et mériteraient un suivi à plus long terme.

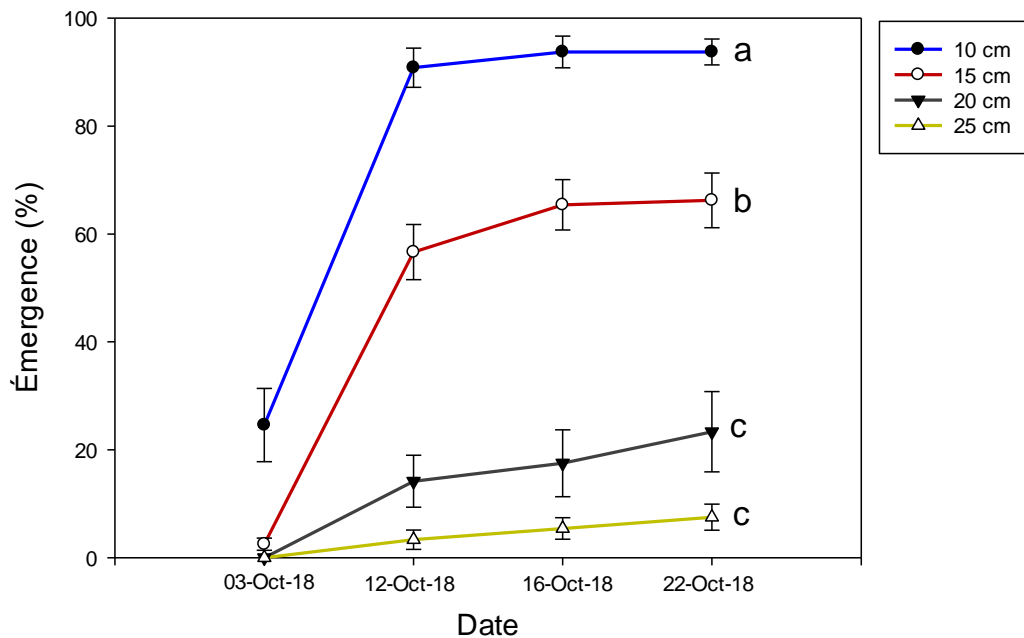


Figure 5: Taux d'émergence des feuilles à l'automne (moyenne \pm erreur type) pour les cormes plantés en 2018 à 10, 15, 20 et 25 cm de profondeur. n = 6.

Expérience B : Période de plantation

En 2017, les cormes ont été plantés le 25 juillet, le 7 août, le 21 août et le 5 septembre. En 2018, les cormes ont été plantés le 25 juillet, le 8 août, le 21 août et le 7 septembre.

L'émergence a été affectée par la période de plantation des cormes. En 2017, les cormes plantés le 5 septembre accusait un retard d'émergence significatif par rapport aux 3 autres

traitements (plus de 2,5 fois moins de cornes émergés pour les cornes plantés le 5 septembre que pour les autres dates de plantation; figure 6), sauf à la dernière date de mesure (4 novembre 2017) où les différences n'étaient plus significatives. La période de plantation a aussi eu un effet significatif sur le nombre de fleurs (figure 7) et la quantité de safran sec (figure 8) récoltés par parcelle. En effet, les cornes plantés le 21 août 2017 (traitement P3) ont significativement mieux performé que ceux plantés aux trois autres périodes (performance en moyenne deux fois plus élevée pour chacune des variables). Le taux de floraison moyen pour cette expérience est de 29 %. Bien que certaines études ont montré que la période optimale de plantation des cornes de safran serait entre le 5 juin et le 5 juillet, soit juste après leur entrée en dormance (Bayat, et al. 2016), ces dates sont possiblement trop hâtives au Québec, considérant que la sénescence survient ici en juillet. De plus, les cornes ne sont disponibles sur le marché qu'en août et septembre pour débiter de nouvelles plantations.

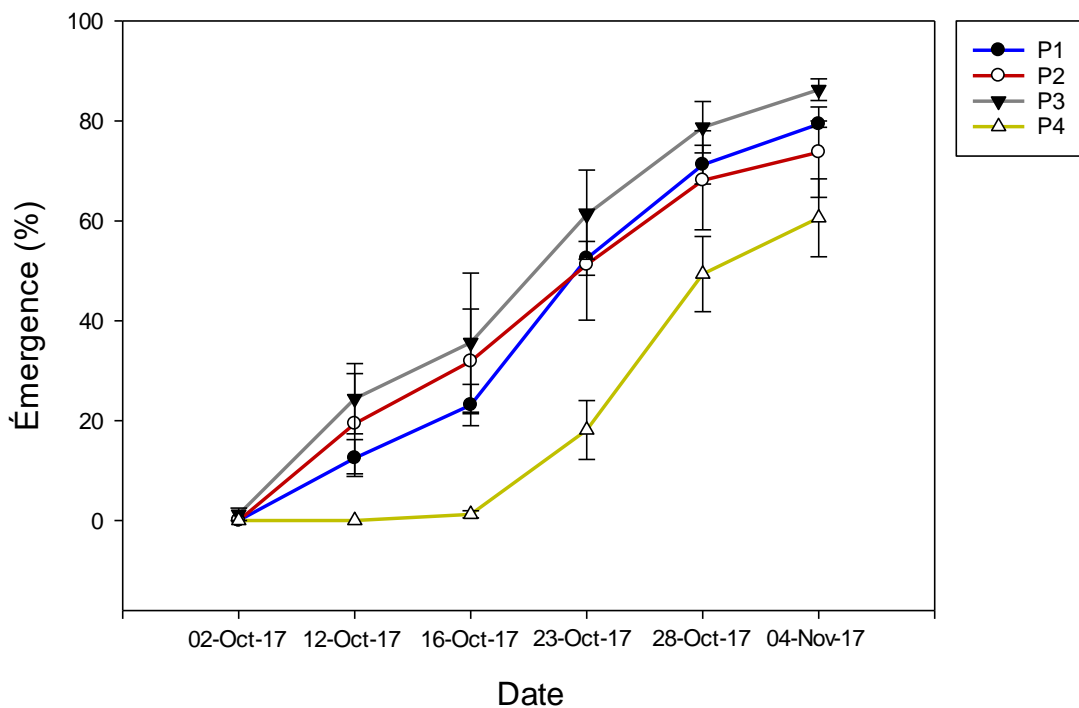


Figure 6 : Taux d'émergence des feuilles (moyenne \pm erreur type) à l'automne 2017 selon la date de plantation des cornes (P1 : 25 juillet, P2 : 7 août, P3 : 21 août et P4 : 5 septembre). n = 4.

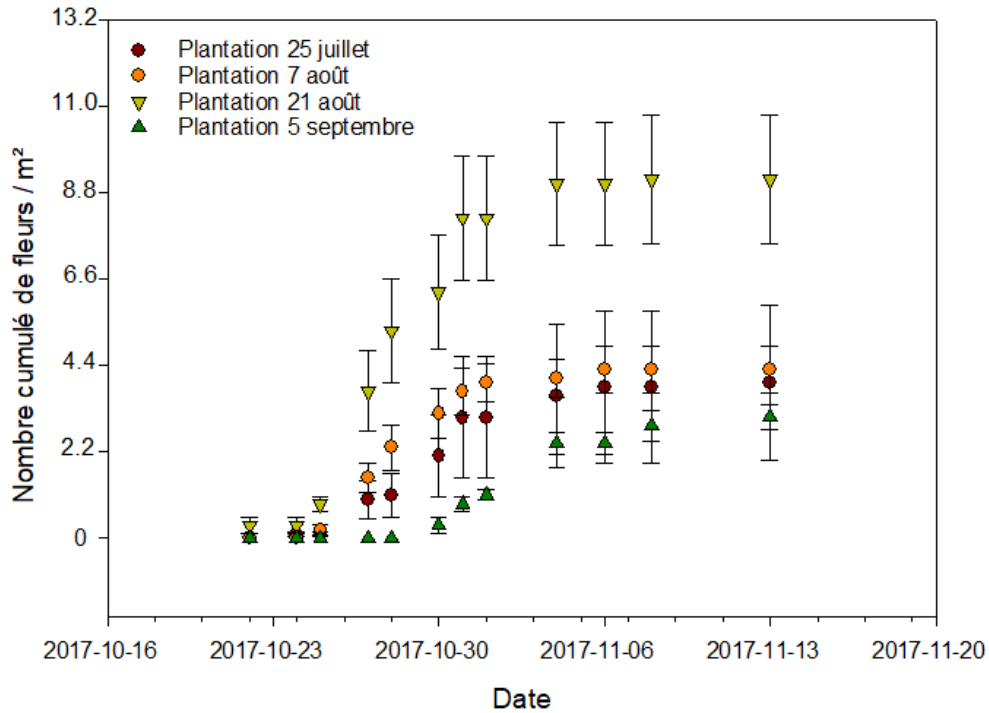


Figure 7 : Nombre cumulé de fleurs récoltées par m^2 (moyenne \pm erreur type), entre le 22 octobre et le 13 novembre 2017 selon la date de plantation des cornes. $n = 4$.

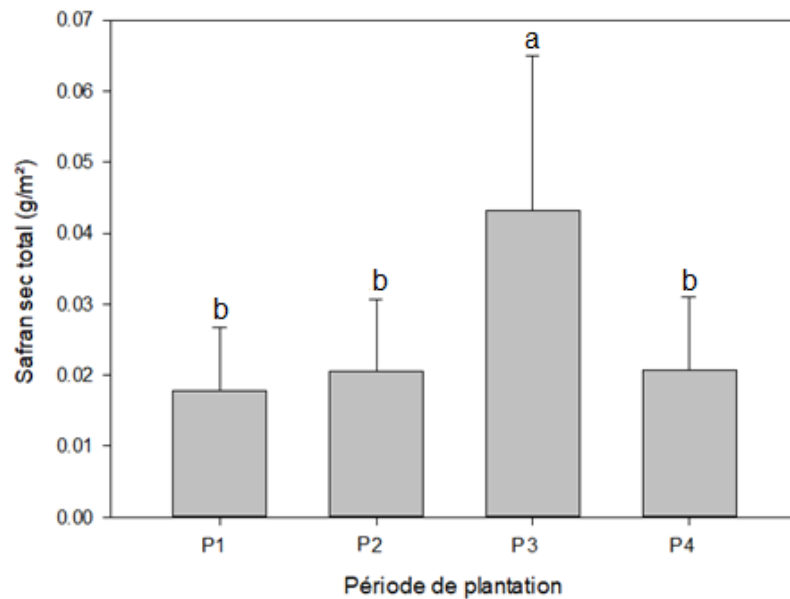


Figure 8 : Quantité totale de safran récolté au cours de l'automne 2017 ($g\ m^{-2}$; moyenne \pm erreur type) selon la date de plantation des cornes (P1 : 25 juillet, P2 : 7 août, P3 : 21 août et P4 : 5 septembre). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements. Le pourcentage moyen de

floraison varie selon les traitements (25 juillet : 23 %, 7 août : 24 %, 21 août : 52 %, 5 septembre : 18 %). n = 4.

En 2018, les températures des mois correspondants à la période de floraison ont été beaucoup plus faibles qu'au cours des deux années précédentes. Le faible taux d'émergence et la faible taille des pousses au moment de l'arrivée de la neige expliquent fort probablement l'absence de fleurs. Malheureusement, ceci nous empêche de valider l'impact des traitements sur le taux de floraison. Néanmoins, nous pouvons constater que les dates de plantation influencent les taux d'émergence. De nouveau en 2018, la plantation effectuée au début septembre (P4; figure 9) montre des retards d'émergence qui disparaissent lors de la dernière date de mesure avant l'arrivée de la neige. Cependant, en 2018, ce sont les cornes plantés au début août (P1) plutôt que ceux plantés à la 3^e semaine d'août (P3) qui émergent un peu plus tôt. L'analyse combinée des données de 2017 et 2018 confirme qu'à la dernière date d'observation, tous les traitements présentent des taux similaires d'émergence, mais que le taux d'émergence était plus élevé en 2017 qu'en 2018.

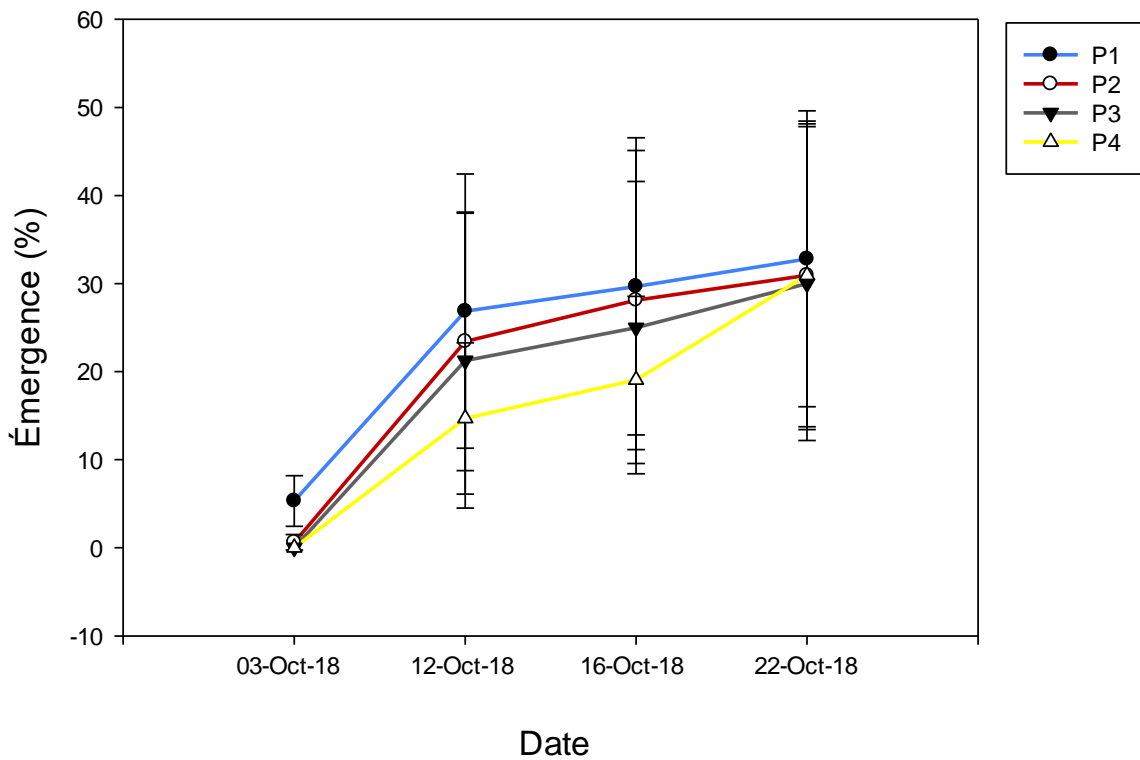


Figure 9 : Taux d'émergence des feuilles à l'automne 2018 (moyenne \pm erreur type) selon la date de plantation des cornes (P1 : 25 juillet, P2 : 8 août, P3 : 21 août et P4 : 7 septembre). n = 4

L'émergence des plants se poursuit durant l'hiver et au printemps 2018, on observe des taux d'émergence autour du 90 % (figure 10) pour toutes les périodes de plantation de l'automne 2017. Pour les cornes plantés à l'automne 2018, on note le printemps suivant (2019), un taux d'émergence plus faible soit en moyenne de 72 %. L'interaction année × traitement est significative. L'émergence printanière ne diffère pas entre les périodes de plantation de l'automne 2017, alors que l'émergence des plants issus de la plantation du début septembre est plus faible que celle de plants issus de la plantation de la 3^e semaine d'août pour les cornes plantés à l'automne 2018.

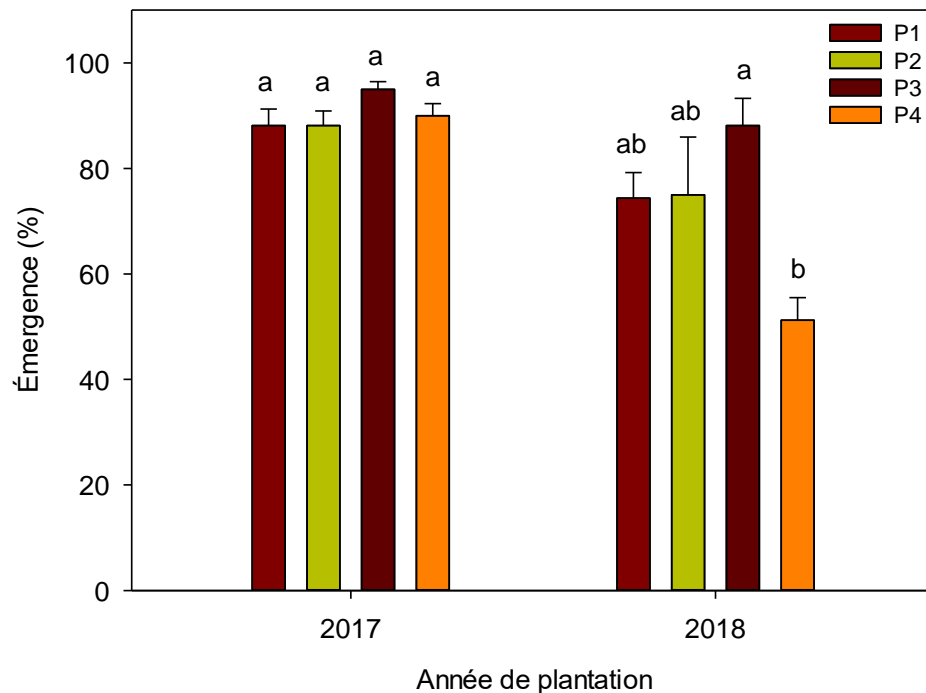


Figure 10: Taux d'émergence finale (moyenne ± erreur type) au printemps suivant pour les cornes plantés en 2017 et en 2018 selon les périodes de plantation des cornes (P1 : 25 juillet, P2 : 7 ou 8 août, P3 : 21 août et P4 : 5 ou 7 septembre). n= 4.

Tout comme pour l'expérience de profondeur de plantation (figure 4), la sénescence au début de l'été 2018 était relativement synchrone entre les traitements (dates de plantation de 2017; figure 11). Il semble que les conditions météorologiques ont une influence prépondérante sur la sénescence du feuillage en début d'été, et ce même si les plants n'ont pas tous émergé au même moment l'automne précédent. Les cornes récoltés après la sénescence présentent des masses semblables entre les traitements. Il semble donc que le fait d'émerger un peu plus tardivement à l'automne n'influence pas la quantité de biomasse qui s'accumule dans le corne en fin de saison. On note cependant, une tendance à se diviser davantage chez ceux plantés au début septembre comparativement aux autres dates de plantation. Il semble donc que l'impact de la profondeur de plantation sur la masse

des cornes ne soient pas dû au retard d'émergence chez les cornes plantés plus profondément. Il est possible que l'énergie supplémentaire requise pour atteindre la surface limite la quantité d'énergie transférée du corne initial vers le ou les nouveaux cornes.

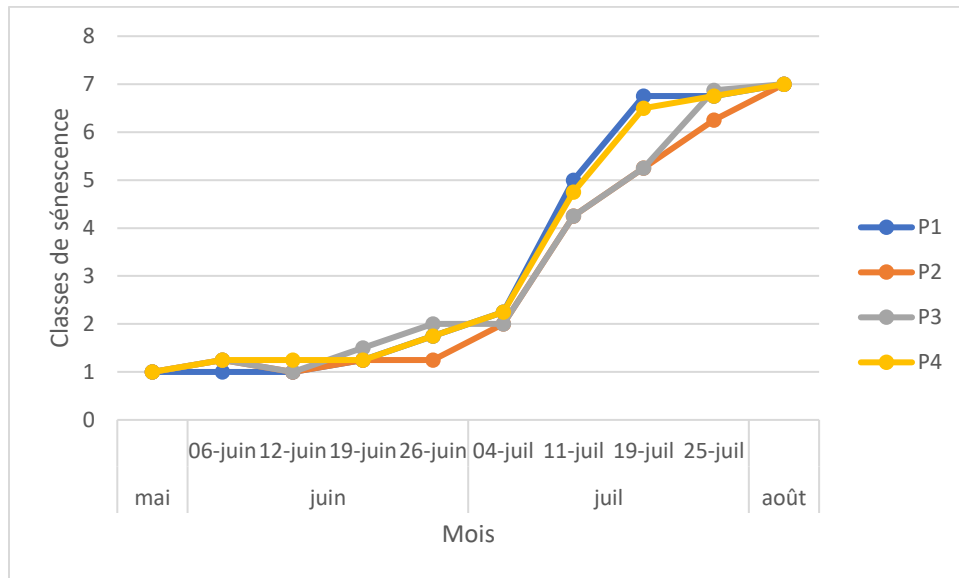


Figure 11 : Évolution de la sénescence du feuillage à l'été 2018 pour les cornes plantés à différentes dates en 2017 (P1 : 25 juillet; P2 : 7 août; P3 : 21 août et P4 : 5 septembre). Les classes de sénescence sont présentées au tableau 1. n = 4.

VOLET 2 : Fertilisation, ajout de mycorhizes et ajout de biostimulants

Émergence et floraison

Au 23 octobre 2017, la fertilisation avait un effet significatif sur le pourcentage de plants émergés par parcelle ($p = 0,018$, aucune fertilisation : 32 %, avec fertilisation : 49 %), alors que l'ajout de mycorhizes avait un effet marginalement significatif ($p=0,064$, sans ajout: 34 %, avec mycorhizes : 47 %).

L'effet positif de la fertilisation sur l'émergence était encore visible au moment du dernier suivi d'émergence le 4 novembre 2017, mais pas celui de l'ajout de mycorhizes (figure 12). De plus, l'interaction mycorhizes x biostimulant a eu un effet significatif sur le rendement en safran sec des parcelles ($p=0.042$). Les parcelles avec mycorhizes, mais sans biostimulants (M1B0) ont produit plus de safran sec que les parcelles sans mycorhizes et sans biostimulant (M0B0) ou les parcelles avec trempage dans le Turitek (M1B2 et M0B2). Le taux de floraison moyen pour cette expérience est de 71 %.

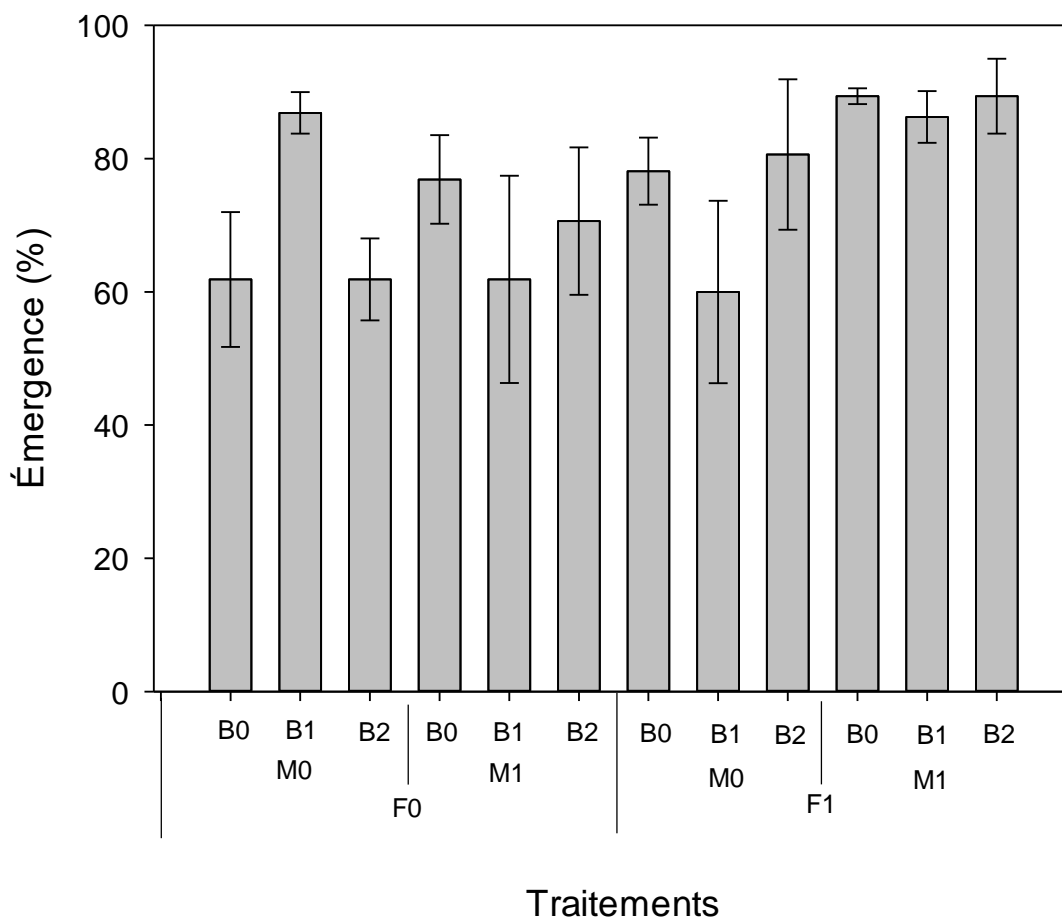


Figure 12 : Taux d'émergence des feuilles à l'automne 2017 (moyenne \pm erreur type) selon le traitement de fertilisation, de mycorrhization ou de biostimulants appliqué. F0 : aucune fertilisation, F1 : fertilisation, M0 : aucun ajout de mycorhizes, M1: ajout de mycorhizes, B0 : aucun ajout de biostimulants, B1 : ajout de EarthAlive Soil Activator, B2 : ajout de Turitek. n = 4

Au printemps 2018, quel que soit le traitement appliqué, le taux d'émergence finale a été élevé, dépassant 90 % dans la plupart des parcelles (figure 13 ; aucune différence significative entre les traitements). Ceci montre que les plantes sont capables de bien se développer et d'émerger même après l'établissement d'un couvert de neige permanent. Les températures du sol se maintiennent autour de 0 °C pendant tout l'hiver (données non présentées).

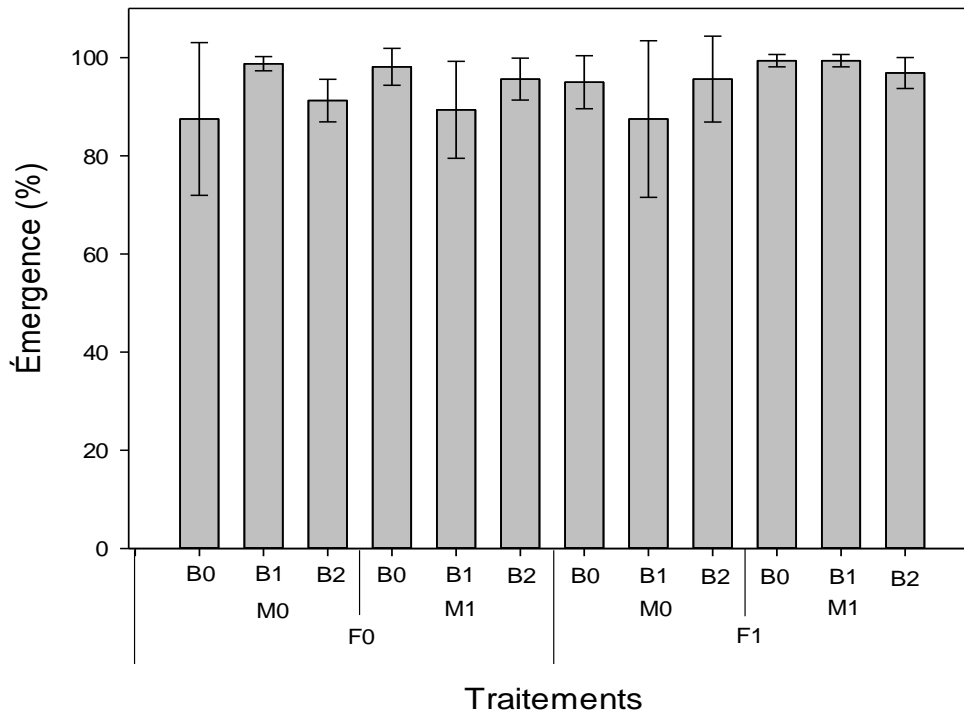


Figure 13: Taux d'émergence finale des feuilles (moyenne \pm erreur type) au printemps 2018 en fonction des différents traitements de fertilisation, de mycorhization ou de biostimulants appliqués au moment de la plantation en 2017. F0 : aucune fertilisation, F1 : fertilisation, M0 : aucun ajout de mycorhizes, M1: ajout de mycorhizes, B0 : aucun ajout de biostimulants, B1 : ajout de EarthAlive Soil Activator, B2 : ajout de Turitek. n = 4

Tout comme pour les autres expériences (profondeur de plantation ainsi que période de plantation), la sénescence au début de l'été 2018 était relativement synchrone entre les traitements (figure 14). Au 25 juillet, la plupart des plants avaient atteint 100 % de sénescence.

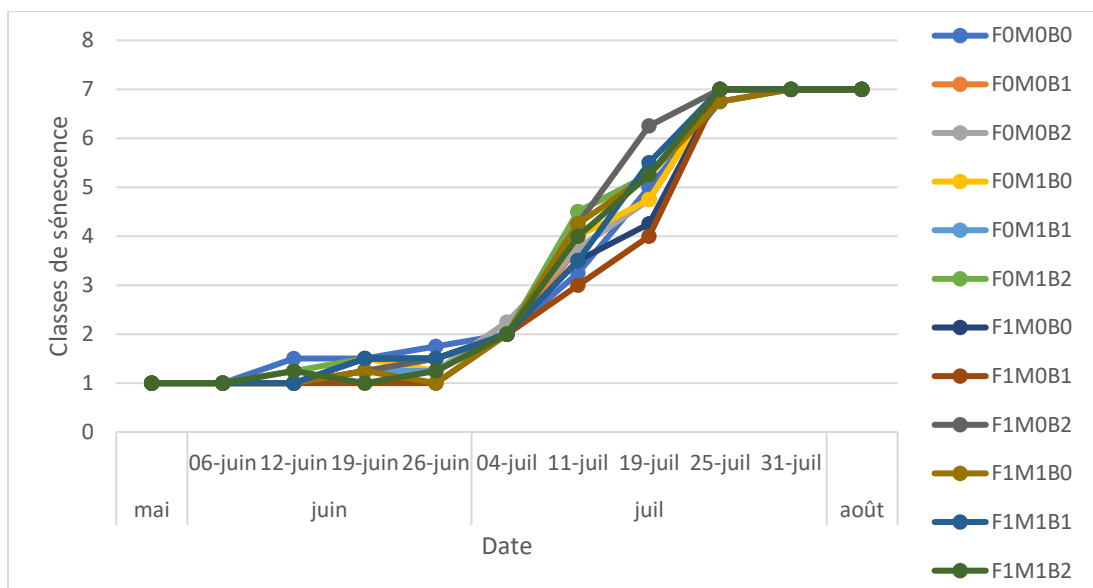


Figure 14: Évolution de la sénescence du feuillage à l'été 2018 pour les cornes plantés en 2017 selon les différents traitements de fertilisation, de mycorhization et de biostimulants appliqués. F0 : aucune fertilisation, F1 : fertilisation, M0 : aucun ajout de mycorhizes, M1: ajout de mycorhizes, B0 : aucun ajout de biostimulants, B1 : ajout de EarthAlive Soil Activator, B2 : ajout de Turitek. Les classes de sénescence sont présentées au tableau 1. n = 4.

Taux de mycorhization

Seule la fertilisation a eu un effet significatif sur le taux de mycorhization. En présence de fertilisation le taux de mycorhization est autour de 5 %, alors qu'en absence de fertilisation, la mycorhization dépasse 20 % en moyenne pour toutes les parcelles (figure 15). Il est fréquent d'observer une baisse du taux de mycorhization chez les plants fertilisés (Soonvald, et al. 2019). La source de mycorhize que nous avons utilisée ne semble pas avoir réussi à coloniser les racines soit parce que les conditions n'ont pas été favorables pour que les spores germent soit par ce que le safran interagit mieux avec d'autres espèces de champignons mycorhiziens déjà présents dans le sol.

D'autres études ont montré que les mycorhizes arbusculaires colonisent intensivement le safran et ont généralement un impact important sur la croissance et le rendement de cette espèce (Kianmehr 1981). En effet, lors d'études précédentes les champignons mycorhiziens ont permis d'augmenter le diamètre des cornes en première année et une production florale plus élevée en deuxième année de croissance. En outre, le moment de la floraison a été affecté par les micro-organismes bénéfiques (Aimo, et al. 2010). Ainsi, Aimo et collaborateurs (2010) ont trouvé que le taux de mycorhization chez le safran varie entre 10 et 30 %.

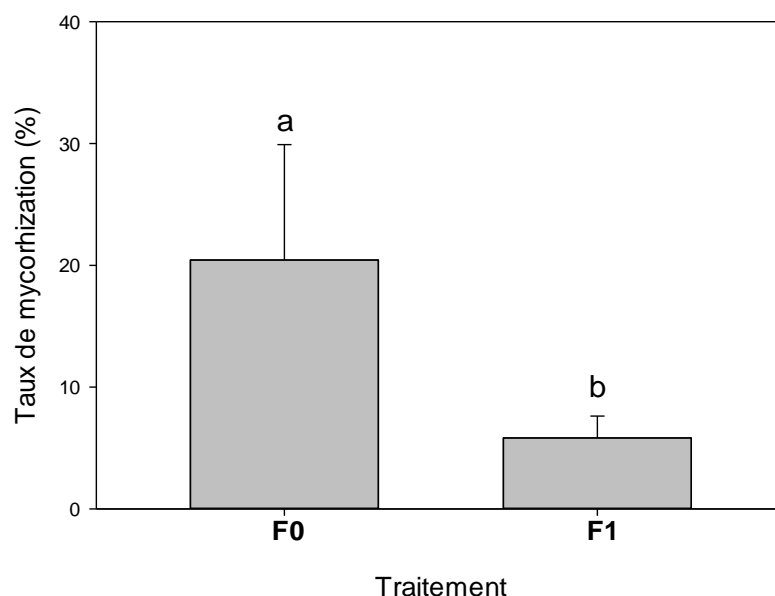


Figure 15 : Effet de la fertilisation sur le taux de mycorhization (moyenne \pm erreur type) des cormes de safran récoltés au printemps 2018. n = 24.

Analyse des cormes de l'expérience de fertilisation du MAPAQ à Shawinigan

Les teneurs des cormes en N, P, K, Ca et Mg étaient similaires entre les traitements, à la fin de la saison de croissance (juillet 2017) soit deux ans après la fertilisation. Nous avons récolté d'autres cormes à l'été 2018. Cependant, la majorité d'entre eux présentaient des dommages causés par le ver fil de fer. Étant donné l'absence de différence la première année et les problèmes phytosanitaires importants, les cormes n'ont pas été analysés en 2018.

Analyse des cormes de l'expérience de fertilisation du MAPAQ à Baie-St-Paul

La fertilisation appliquée au moment de la plantation a augmenté la teneur en N et Mg et légèrement diminué la teneur en P dans les cormes à la fin de la saison suivante (été 2018). La teneur en azote a atteint $14 \pm 0,7 \text{ mg g}^{-1}$, la teneur en Mg $0,80 \pm 0,07 \text{ mg g}^{-1}$ et la teneur en P $1,35 \pm 0,1 \text{ mg g}^{-1}$ chez les plants fertilisés. Chez les plants non fertilisés, les teneurs en azote étaient de $10 \pm 0,6 \text{ mg g}^{-1}$, les teneurs en Mg $0,55 \pm 0,03 \text{ mg g}^{-1}$ et les teneurs en P $1,55 \pm 0,1 \text{ mg g}^{-1}$. Les plants ont donc absorbé au moins en partie l'azote et le magnésium contenus dans les fertilisants. Cependant, cette meilleure nutrition minérale ne s'est pas traduite l'automne suivant par une meilleure émergence ni une meilleure floraison. Nous ne savons pas pourquoi la teneur en P a légèrement diminué chez les plants fertilisés, et ce malgré l'ajout de poudre d'os. Le phosphore est souvent considéré comme un élément essentiel pour l'induction florale (Boonekamp 1997). Il stimule la floraison et améliore la qualité des fleurs. Une étude effectuée sur le safran a montré qu'une quantité de 9 ppm

dans le sol est suffisante pour un bon rendement en fleurs (Behzad, et al. 1990). Les analyses de sol effectuées avant l'application des fertilisants ont montré des teneurs en P de 20 à 70 kg ha⁻¹ ce qui correspond à environ 7 à 23 ppm pour un sol d'une profondeur de 30 cm. Il est donc possible que certaines parcelles n'aient pas fourni suffisamment de P pour assurer une bonne floraison, bien que le facteur climatique soit fort probablement celui qui a le plus limité la floraison.

Il est étonnant que nous n'ayons observé aucune différence dans les teneurs en nutriments des cornes dans l'expérience effectuée à Shawinigan alors que des traitements de fertilisation similaires ont donné des différences à Baie St-Paul. Dans le cas de l'expérience menée à Shawinigan, les teneurs en nutriments dans les cornes ont été analysés à la fin de la 2^e année, alors que dans l'expérience Fertilisation menée à Baie St-Paul, les analyses ont été effectuées après une année de croissance. Les sols ne présentent pas de différences significatives tant en termes de pH, de teneur en matière organique que de nutriments, à l'exception du cuivre qui est plus abondant au site de Baie St-Paul (0,11 ppm vs 0,05 ppm). Il semble donc que les effets de fertilisation s'estompent rapidement.

Effets de la fertilisation sur le nombre de cornes, la masse totale, la masse moyenne et la masse du plus gros corne (g)

Seule la fertilisation a eu un effet significatif sur la masse et le nombre de cornes à la fin de la première saison de croissance (été 2018). La fertilisation a stimulé la production de nouveaux cornes (figure 16), ainsi que la masse du plus gros corne (figure 17). Le grade 8 qui correspond au grade assurant une floraison correspond à une masse fraîche de 7,5 g.

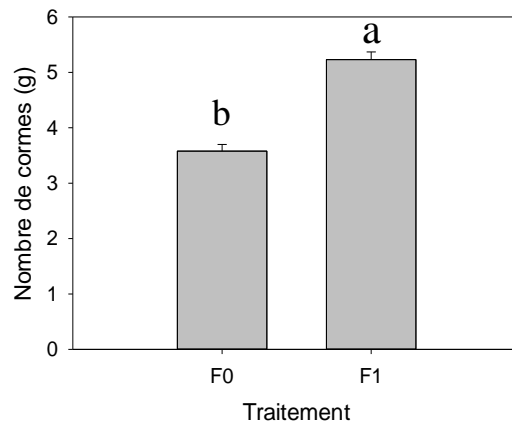


Figure 16 : Effet de la fertilisation sur le nombre de cornes produits au cours de l'année 2017-2018. Les cornes ont été récoltés à l'été 2018. n =24.

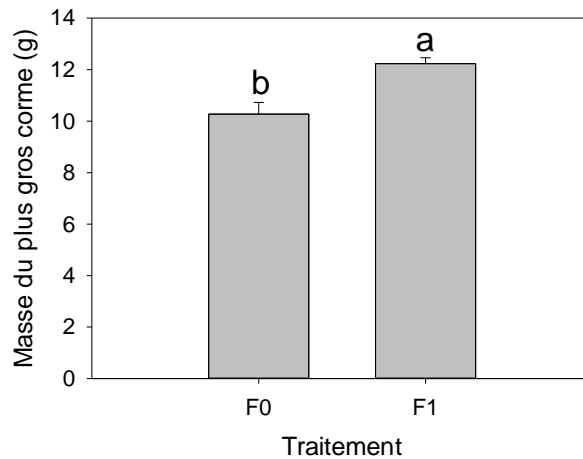


Figure 17 : Effet de la fertilisation sur la masse fraîche du plus gros corne produit au cours de l'année 2017-2018. Les cornes ont été récoltés à l'été 2018. n = 24.

En induisant à la fois un corne principal plus gros et un plus grand nombre de cornes, la fertilisation favorise également une masse totale des cornes plus élevée (figure 18). Cependant, certains des cornes excédentaires sont très petits, ce qui fait que la masse moyenne des cornes produits par les plants fertilisés est plus faible que la masse moyenne des cornes produits par les plants non fertilisés (figure 19).

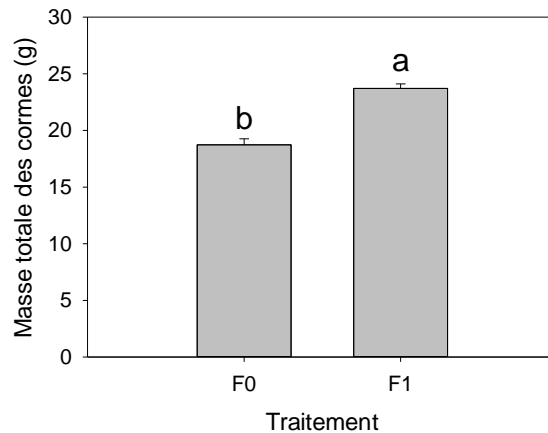


Figure 18 : Effet de la fertilisation sur la masse fraîche totale des cornes produits au cours de l'année 2017-2018. Les cornes ont été récoltés à l'été 2018. n = 24.

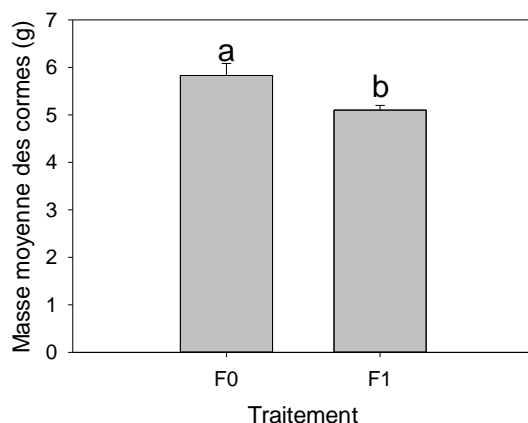


Figure 19 : Effet de la fertilisation sur la masse fraîche moyenne des cornes produits au cours de l'année 2017-2018. Les cornes ont été récoltés à l'été 2018. n = 24.

VOLET 3 : Contrôle des plantes adventices par compagnonnage ou paillis

Nous avons mesuré la température à la profondeur des cornes (20 cm) afin de déterminer si la présence de paillis ou de plantes compagnes auraient une influence sur la température du sol. Malgré quelques variations temporaires, aucune différence significative n'a été observée entre les différents traitements pour l'ensemble de la saison (figure 20).

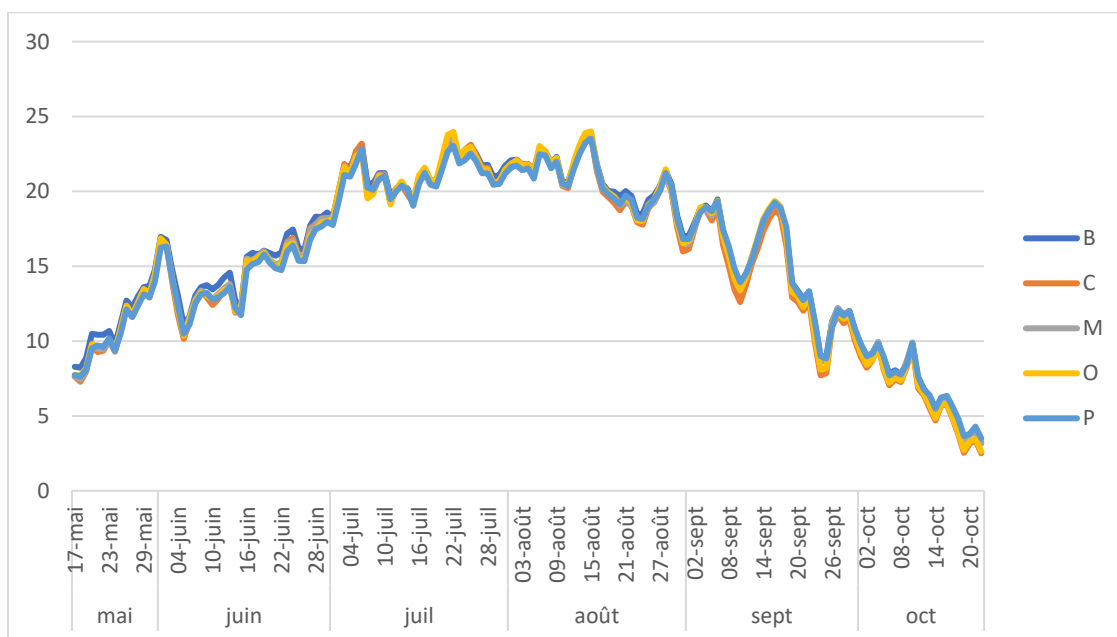


Figure 20 : Moyennes des températures mesurées à 20 cm de profondeur entre les mois de mai 2018 et octobre 2018 en fonction des traitements appliqués pour contrôler les adventices. B : Paillis BRF; C : culture de compagnonnage avec capucine;

M : désherbage manuel; O : culture de compagnonnage avec Oignon égyptien; P : pyrodésherbage. n = 3.

Puisque les traitements n'avaient pas encore été appliqués à l'automne 2017, nous n'avons observé aucune différence entre les parcelles en ce qui concerne l'émergence (figure 21) et le nombre de fleurs. Le taux de floraison moyen par parcelle a été de 86 % en 2017. En 2018, une faible émergence qui n'a pas dépassé 2 % dans tous les traitements a été enregistrée. Même si l'émergence a été faible dans les autres expériences également (profondeur de plantation, fertilisation), il semble que l'émergence la plus faible ait été enregistrée dans les parcelles de l'expérience Contrôle des plantes adventices par compagnonnage ou paillis. Aucune fleur n'a été récoltée dans ces parcelles.

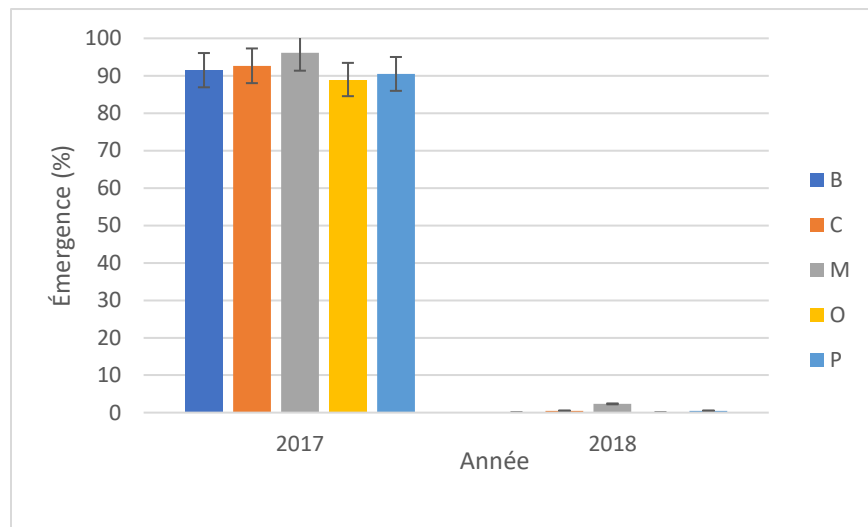


Figure 21 : Taux d'émergence des feuilles (moyenne \pm erreur type) à l'automne 2017 et 2018 selon les différents traitements de contrôle d'adventices. B : Paillis BRF; C : culture de compagnonnage avec capucine; M : désherbage manuel; O : culture de compagnonnage avec Oignon égyptien; P : Pyrodésherbage. n = 6.

Au printemps 2018, la quasi-totalité des cormes dans cette expérience avait émergé, quel que soit le traitement appliqué (figure 22). Aucune différence significative n'a été notée entre les traitements.

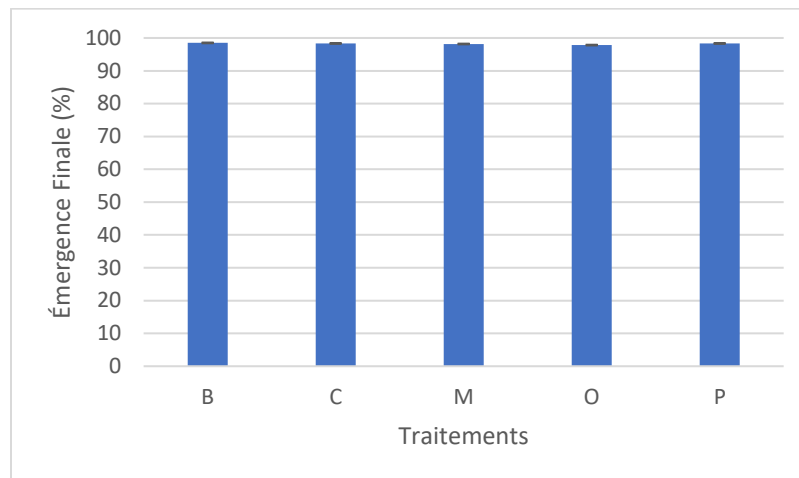


Figure 22 : Taux d'émergence final des feuilles (moyenne \pm erreur type) au printemps 2018 selon les différents traitements de contrôle d'adventices. B : Paillis BRF; C : culture de compagnonnage avec capucine; M : désherbage manuel; O : culture de compagnonnage avec Oignon égyptien; P : Pyrodésherbage. n = 6.

Comme pour les autres expériences, la sénescence au début de l'été 2018 était relativement synchrone entre les différents traitements de contrôle des adventices et la sénescence totale a été observée à la fin juillet (données non présentées). Ces résultats suggèrent fortement que les conditions météorologiques au moment de la sénescence contrôlent son induction et sa progression. L'entrée en dormance tardive (fin juillet) a fort probablement eu une incidence sur le faible taux d'émergence observé à l'automne 2018.

Temps de désherbage

Le but de cette expérience était de trouver le moyen le plus efficace de contrôler les adventices du fait que les parcelles sont laissées à nu durant l'été. Le désherbage manuel est efficace, mais prend beaucoup plus de temps que le pyrodésherbage (figure 23). La présence d'un paillis BRF réduit considérablement le temps requis pour désherber. Mais il faut noter que l'utilisation du paillis BRF semble augmenter l'humidité du sol (observation personnelle) et a causé l'apparition de certains champignons (présence de carpophores sur le paillis). Par ailleurs, le pyrodésherbage requiert un fauchage des adventices au préalable, car il ne peut être appliqué qu'après la sénescence totale du safran et donc à un moment où les adventices ont atteint une taille importante. La présence de plantes compagnes n'a pas réduit de façon significative le temps requis pour désherber à la main ces parcelles.

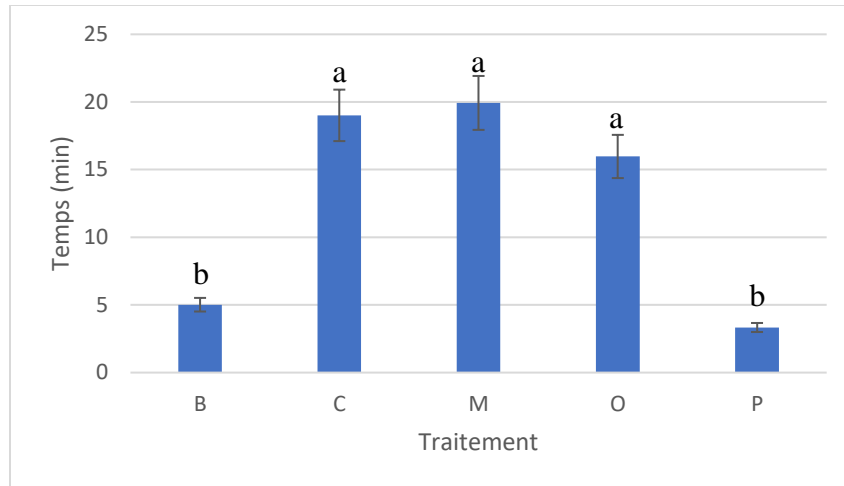


Figure 23 : Temps de désherbage par m² cumulé pour la saison (moyenne ± erreur type) pour chaque traitement (B : Paillis BRF ; C : capucine ; M : Manuel ; O : Oignon égyptien; P : Pyrodésherbage). n = 6.

Cultures de compagnonnage

La capucine et l'oignon égyptien ont été choisis du fait qu'elles complètent leur cycle relativement tôt, ne nuisant pas à la récolte du safran à l'automne. En effet, nous avons récolté les oignons égyptiens à la mi-septembre et les fleurs de capucine du 8 août 2018 jusqu'à la fin septembre (figure 24).

Au cours de la saison, nous avons récolté un poids frais total de 33 g de capucine/m² ce qui correspond à 48 fleurs/m². Malheureusement, aucune vente n'a été effectuée et nous n'avons pas réussi à obtenir un prix de vente au Québec pour cette production. De plus, puisqu'aucune fleur de safran n'a été produite à l'automne 2018, il est malheureusement impossible d'estimer l'effet de cette culture de compagnonnage sur le rendement en safran.

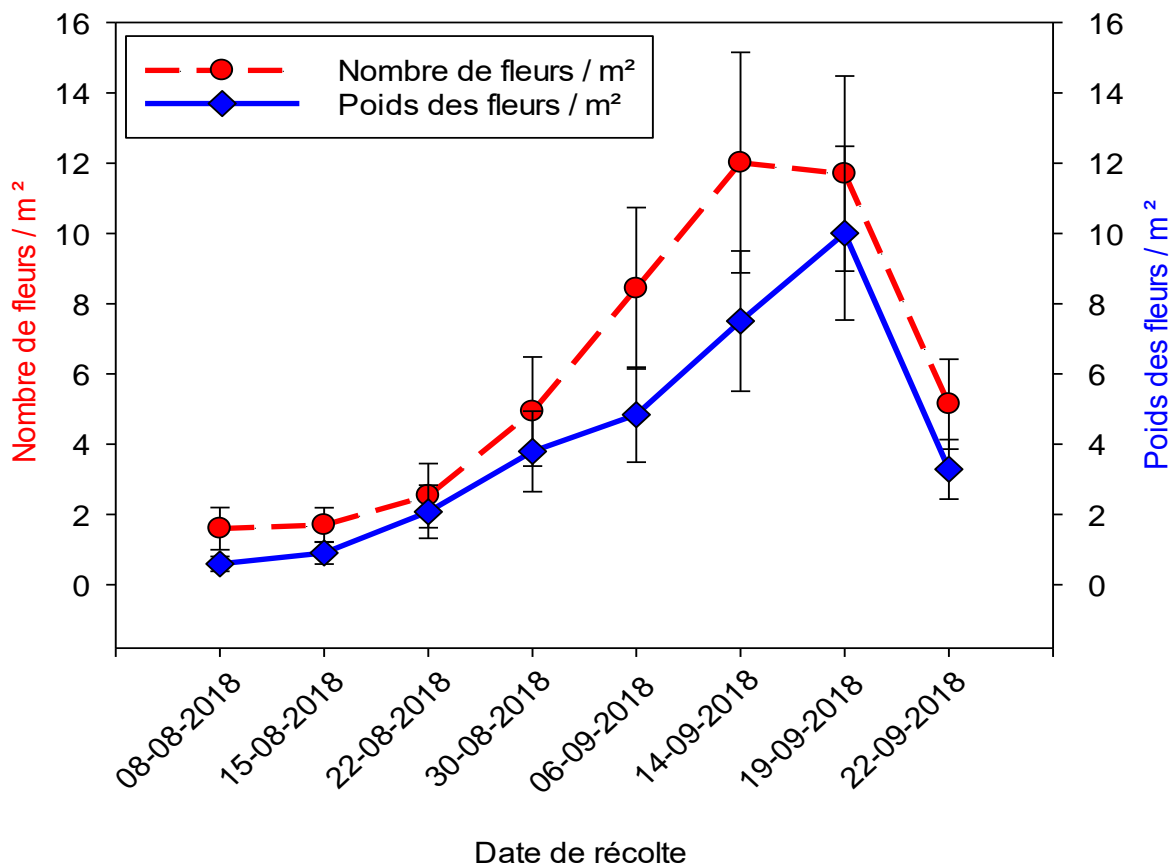


Figure 24 : Nombre et poids frais des fleurs de capucine par m² (moyenne \pm erreur type) récoltées chaque semaine entre le 8 août et le 22 septembre 2018. n = 6.

Un poids de 44 g (\pm 6,9g) de bulbilles d'oignon égyptien a été récolté par m², ce qui correspond à 42 bulbilles (\pm 5,2) par m². Le prix de vente de l'oignon égyptien pour la plantation est de 9 \$ pour 10 bulbilles. Selon ces données, la production pourrait générer un gain potentiel de 37.80 \$ par m² pour le producteur ou la productrice. Nous n'avons pas trouvé d'information sur le prix de vente des bulbilles de l'oignon égyptien dans les épiceries, les marchés publics ou dans l'industrie de transformation.

Orientation du corme lors de la plantation

Au 16 octobre 2017, l'émergence des cormes du traitement 45° était en avance sur celle des quatre autres traitements qui ne différaient pas entre eux. Le 23 octobre, il ne restait qu'une différence marginalement significative ($p = 0,067$) entre les traitements 45° et 180°

(figure 25). L'orientation du corne au moment de sa plantation a également eu un effet marginalement significatif ($p = 0,067$) sur le nombre total de fleurs produites par parcelle. Les cornes plantés à 45° ont produit 1,7 à 2,2 fois plus de fleurs que les traitements 180° et 135° , respectivement. Il n'y a pas eu de différence significative entre les traitements 0° , 45° et 90° . Les mêmes tendances entre les traitements ont été observées pour la quantité totale de safran sec récolté par parcelle ($p = 0,078$). Le taux de floraison moyen par parcelle pour l'expérience a été de 82 %.

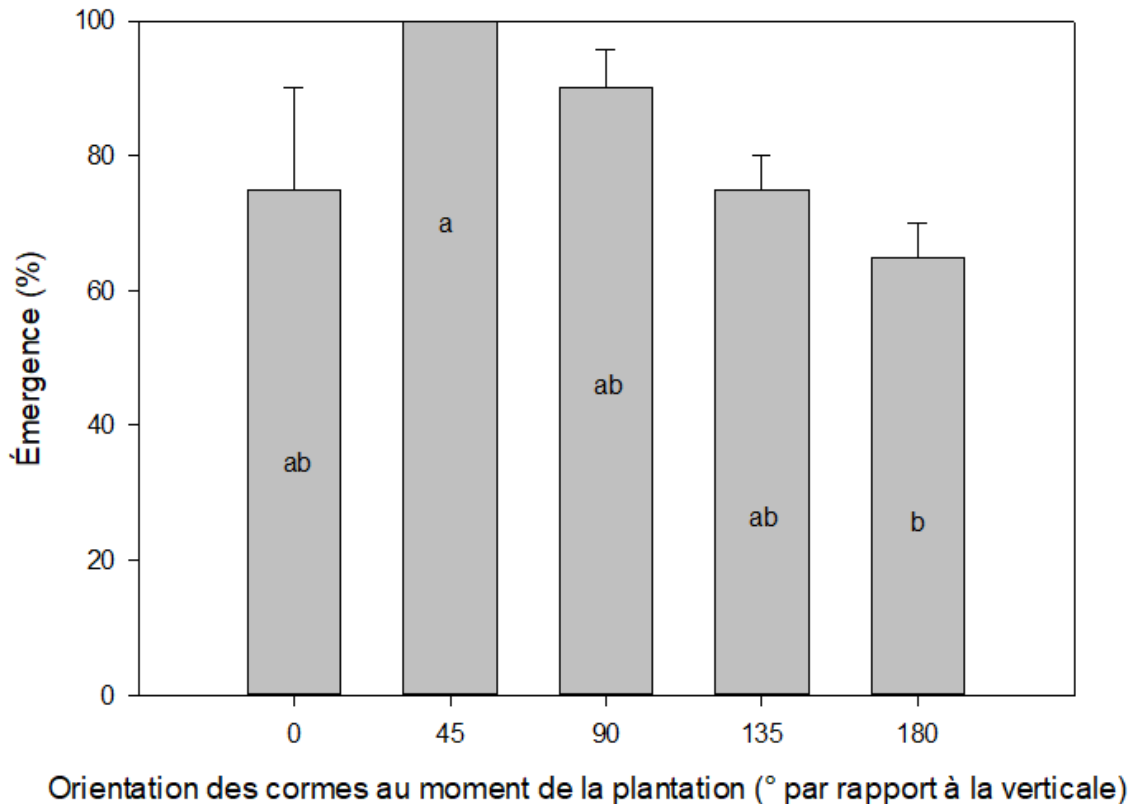


Figure 25 : Taux d'émergence des feuilles à l'automne 2017 (23 octobre 2017; moyenne \pm erreur type) en fonction de l'orientation du corne au moment de la plantation. $n = 4$.

Au printemps 2018, l'émergence finale (survie) était d'environ 60 % pour tous les traitements (figure 26). Cependant, à l'automne 2018 presque aucun corne n'a produit de feuilles avant l'arrivée de la neige. En 2019, le taux d'émergence finale (survie) a dépassé les 80 % pour tous les traitements. Il y a probablement eu division chez certains cornes ce qui expliquerait pourquoi les taux d'émergence printanière en 2019 sont plus élevés que ceux de 2018.

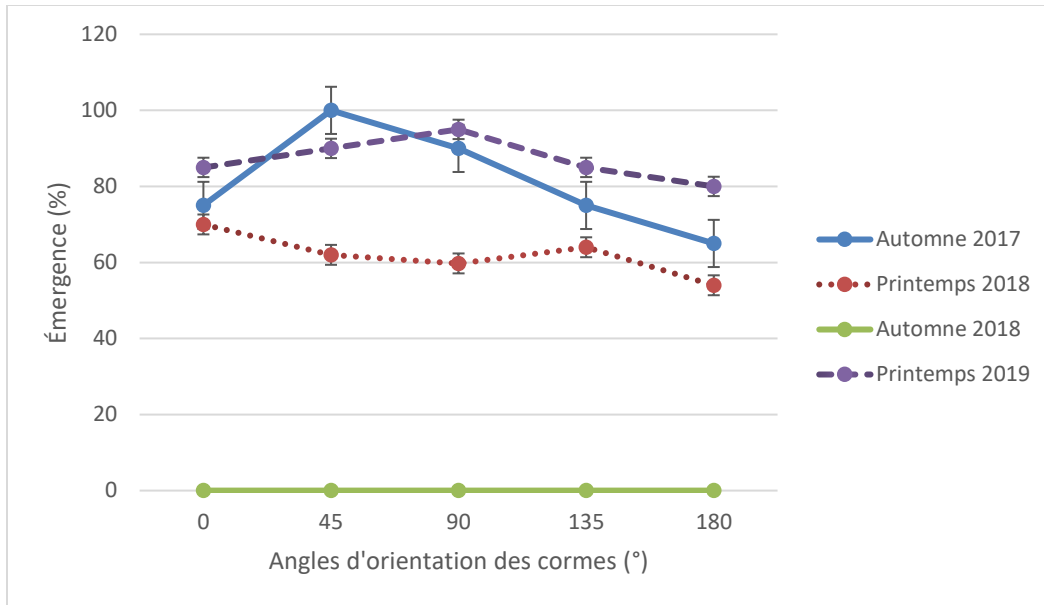


Figure 26 : Taux d'émergence à l'automne et au printemps selon les différentes orientations (angles de plantation par rapport à la verticale en°) de plantations des cornes à l'automne 2017. Les données sont présentées pour les deux premières saisons de croissance. n = 4.

Comme pour les autres expériences, la sénescence au début de l'été 2018 était relativement synchrone entre les différents traitements d'orientation des cornes. Ce qui est particulier pour cette expérience est le fait que l'entrée en sénescence était précoce (11 juillet) par rapport aux autres expériences (figure 27). Nous n'avons pas d'explication pour expliquer cette sénescence plus hâtive.

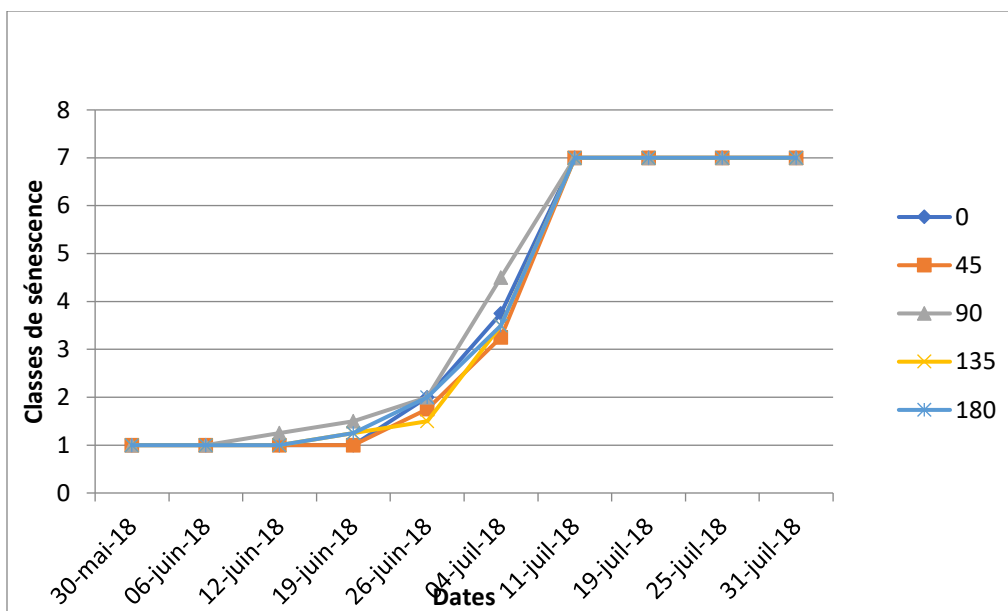


Figure 27: L'évolution de la sénescence du feuillage à l'été 2018 (moyenne \pm erreur type) pour des cornes plantés en 2017 selon les différentes orientations (0 à 180° par rapport à la verticale). Les classes de sénescence sont présentées au tableau 1. n = 4.

Émergence finale en 2019 dans les différentes expériences

Au printemps 2019, le taux d'émergence finale (survie) de toutes les expériences a dépassé 80 %, sauf la première expérience Profondeur (20 à 30 cm) où peu de plants ont survécu (figure 28). On note peu de différences entre les différents traitements de la même expérience (données non présentées). Donc, le feuillage émerge sous la neige et possiblement les fleurs qui ne peuvent cependant pas être récoltées.

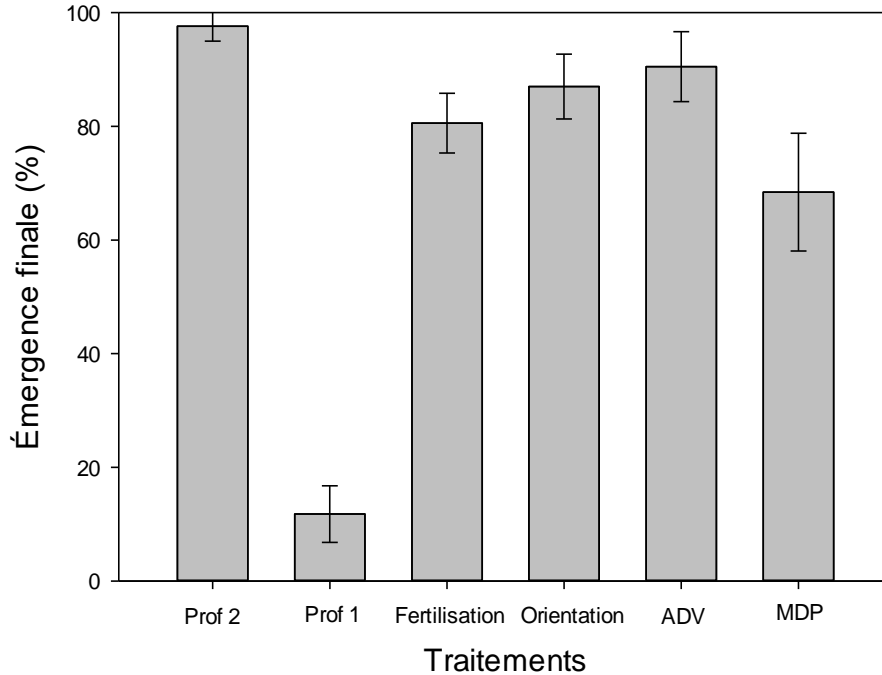
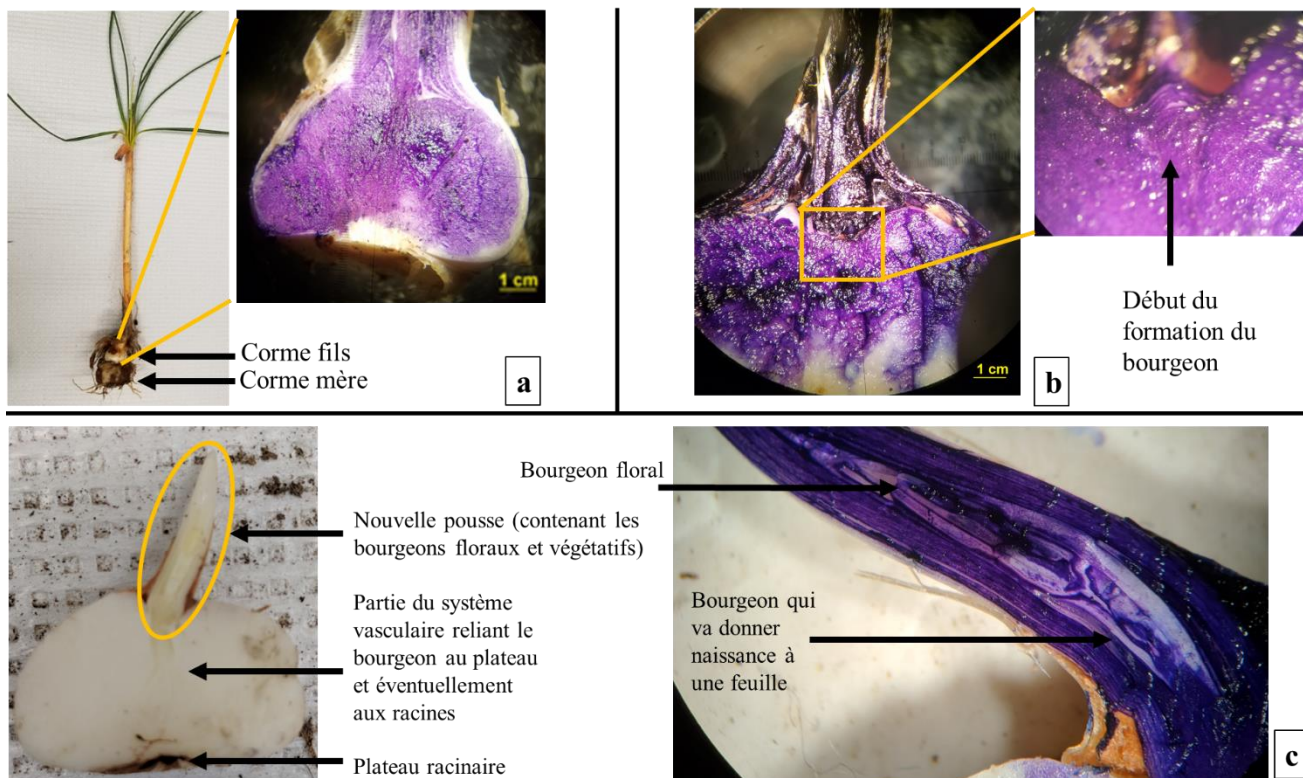


Figure 28 : Émergence finale (moyenne \pm erreur type) des différentes expériences au printemps 2019. ADV : expérience de contrôle des adventices, Prof 1 : première expérience de profondeur (20 à 30 cm) et Prof 2 : deuxième expérience de profondeur (10 à 25 cm), MDP : période de plantation (moyenne des deux années 2017 et 2018).

Induction florale

Lors des premières semaines du printemps, aucun bourgeon n'était visible sur les cormes (figure 29 a). Au début août (8^e semaine d'échantillonnage), les bourgeons ont commencé à apparaître progressivement à la surface du corme (figure 29 b) pour arriver finalement à l'aspect présenté dans la figure 29-c vers la mi-septembre. Donc, les températures nécessaires à la floraison ont été cumulées avant le début août. Des travaux antérieurs ont montré que les températures optimales dans le sol pour l'induction florale sont de 23 à 27 °C pendant 10 à 12 semaines (Molina, et al. 2005). Nous sommes évidemment loin de ces valeurs avec des températures en moyenne de 22 °C pour une durée de 4 semaines en juillet et une à deux semaines en août selon les années (figure 2).



- (a) 1^{ère} semaine de récolte des cormes (17 mai 2018).
- (b) 8^e semaine de récolte des cormes (2 août 2018).
- (c) 14^e semaine de récolte des cormes (17 septembre 2018).

Figure 29: Coupes longitudinales d'un corme du safran effectuées à la 1^{ère}, 8^{ème} et 14^{ème} semaine de la saison de culture pour le suivi de l'induction florale.

CONCLUSION

Volet 1 : Profondeur et période de plantation

Profondeur de plantation

Les températures ont été plus élevées durant l'été (juillet et août) en 2018 qu'en 2017. Ceci aurait dû se traduire par une meilleure floraison, mais comme le mois de juin a été plus frais en 2018, la sénescence a été retardée ce qui pourrait retarder l'induction florale. De plus, les mois de septembre et octobre ont été plus froids en 2018, ce qui semble avoir considérablement retardé l'émergence des feuilles en plus d'inhiber la floraison. La température du sol semble être le facteur qui influence le plus l'émergence et la floraison du safran dans la région de Baie St-Paul.

Le taux d'émergence est plus élevé aux profondeurs de plantation les plus faibles. Les nouveaux essais mis en place à l'été 2018 suggèrent qu'une profondeur de 10 cm pourrait s'avérer encore plus intéressante que la profondeur recommandée soit 20 cm. Il faudra cependant s'assurer que les cormes ne sont pas affectés par le gel lorsque la neige s'accumule tardivement.

La sénescence s'est établie de façon relativement synchrone entre tous les traitements, et ce dans toutes les expériences. Il semble que les conditions météorologiques influencent fortement l'induction et la vitesse de progression de la sénescence foliaire.

Période de plantation

La date de plantation influence la date d'émergence à l'automne et la production de fleurs. Cependant, cet effet n'est plus visible le printemps suivant. En 2017, la meilleure émergence a été observée pour les cormes plantés le 21 août, alors qu'en 2018, les meilleurs résultats ont été obtenus chez les cormes plantés au début août. Les différences sont tout de même relativement faibles entre les dates de plantation du mois d'août, alors que les cormes plantés au début septembre donnent des résultats beaucoup moins intéressants. Des essais supplémentaires et ce dans différentes régions du Québec seront nécessaires pour établir la meilleure date de plantation. Il est attendu que l'effet de la période de plantation s'estompe dès la 2^e année, d'autant plus que les feuilles sénescent en même temps pour tous les traitements.

Volet 2 : Fertilisation, ajout de mycorhizes et biostimulants

Les parcelles fertilisées ont présenté une émergence plus précoce. Par contre, l'ajout de mycorhizes ou de biostimulants n'a eu aucun effet sur l'émergence. Aucun des traitements n'a eu un effet sur la date de sénescence.

La fertilisation augmente la teneur en azote et en magnésium des cormes et diminue sa teneur en phosphore. Il n'existe pas de données fiables dans la littérature nous permettant d'établir le niveau de nutriments requis pour une croissance optimale du safran.

Néanmoins, cette meilleure nutrition minérale s'est traduite par une augmentation du nombre de cornes produits par corne mère. De plus, la masse totale des cornes ainsi que la masse du plus gros corne étaient plus élevées chez les plants fertilisés. Cependant, la masse moyenne des cornes a diminué du fait que la fertilisation a favorisé la production d'un certain nombre de cornes très petits. Seuls les cornes suffisamment gros peuvent fleurir. L'effet de la fertilisation est donc globalement positif, car elle permet d'augmenter la taille du corne principal, et ce malgré une certaine prolifération de petits cornes.

Volet 3 : Contrôle des plantes adventices par compagnonnage ou paillis

Aucun effet n'a été noté sur la température du sol en 2017 et en 2018 pour les différents traitements appliqués, du moins à 20 cm de profondeur. Aucun des traitements n'a influencé l'émergence automnale, l'émergence finale le printemps suivant, ou la sénescence.

L'application d'une couche de 5 cm du paillis BRF et la technique du pyrodésherbage ont permis de minimiser le temps consacré au désherbage manuel. Le paillis semble cependant maintenir le sol plus humide ce qui pourrait entraîner des dommages aux cornes. Le taux d'humidité du sol tout au cours de la saison devra faire l'objet d'un suivi.

Nous n'avons pas de données sur l'impact des cultures de compagnonnage (la capucine et l'oignon égyptien) sur la floraison du safran, du fait de la très faible émergence des plants à l'automne 2018. Mais, nous avons constaté que ces cultures n'ont aucun effet sur l'émergence des plants. Ces deux cultures ont présenté une bonne croissance et, dans le cas de la capucine, une bonne floraison également. Les dates de récolte de ces plantes n'entrent pas en conflit avec la récolte du safran ce qui était la raison principale pour choisir ces deux espèces. Nous n'avons pas de données concernant la valeur marchande de ces deux cultures. Il faudra également s'assurer que leur présence n'affecte pas le taux de floraison du safran.

Orientation du corne

Cet essai nous a permis de constater que les plants émergent sans problème même si le corne n'est pas planté à la verticale. Seuls les cornes complètement inversés ont présenté un retard d'émergence. Il serait donc possible de mécaniser la plantation.

Induction florale

Les bourgeons floraux apparaissent au début août. Il faudrait donc tenter d'augmenter la température du sol en juin et juillet pour favoriser une meilleure induction florale et ainsi augmenter les rendements en safran.

Températures

Les températures tant estivales qu'automnales sont décisives pour la floraison. Les températures du sol en juin et juillet doivent dépasser les 20 °C autour des cornes pour

induire la production de bourgeons floraux. Nous avons constaté également que les températures au mois de septembre et octobre ne doivent pas diminuer trop rapidement sinon l'émergence des feuilles est retardée et celle des fleurs semble complètement inhibée. Évidemment, l'arrivée d'un couvert de neige permanent met fin à la récolte des fleurs.

RECOMMANDATIONS AUX PRODUCTEURS/TRICES DE SAFRAN

Nous recommandons de planter les cormes à 20 cm de profondeur. Cependant, il serait souhaitable de faire des essais à petite échelle à une profondeur de 10 cm, car nos résultats semblent prometteurs. Cependant, il faudra tester ces profondeurs sur des sites où le couvert de neige est faible et non uniquement sur des sites bien enneigés.

Les résultats obtenus au cours des deux dernières années nous montrent que les cormes plantés en août émergent plus tôt que ceux plantés au début septembre.

La fertilisation a eu un impact sur la date d'émergence et sur la taille des cormes, mais cet effet est somme toute limité. Il faudrait effectuer une étude technico-économique pour déterminer si la fertilisation est avantageuse, d'autant plus que les fertilisants biologiques coûtent relativement cher. Les sols au Québec sont plus riches en matière organique que dans les régions connues pour la production du safran ; il n'est donc pas étonnant que la fertilisation ait eu un impact plutôt limité. En effet, les teneurs moyennes de matière organique au Québec varient de 3 à 5% (CRAAQ, 2010). Sur les deux sites qui font partie de cette étude, le taux de matière organique était en moyenne de 3,6%. Dans les autres régions du monde là où le safran est bien répondu, la teneur en matière organique dans le sol ne dépasse pas 2 % surtout en Iran (Kumar, et al. 2009).

Il n'est pas nécessaire de planter les cormes exactement à la verticale ce qui ouvre la voie à une certaine mécanisation de la plantation.

Certains résultats non détaillés dans le présent rapport suggèrent que le type de sol influence le taux d'émergence et de survie du safran. Il serait important de tester ce facteur. Il serait également important de tester des moyens de réchauffer le sol davantage en juin et juillet de même qu'en automne, car le facteur température, combiné à une courte saison de croissance, nous semble de loin ce qui limite le plus la production du safran au Québec.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout le personnel de Gestion et environnement GD qui nous ont assistés tout au long du projet, en particulier Gaétan Duchesne, Naomie Gigault, David Lehoux, Lorraine Dufour et Marc-André Nadeau. Nous voulons également remercier Sharon Boisvert et Guy-Anne Landry, toutes deux agronomes au MAPAQ pour leurs suggestions et leur implication dans la mise en place et le suivi projet. Nous souhaitons également remercier Hugo Bertrand et Rebecca Meloche pour leur aide précieuse sur le

terrain ainsi que Valérie Pronovost pour la saisie des données et la préparation des échantillons au laboratoire.

LITTÉRATURE CITÉE

- Aimo, S., F. Gosetti, G. D'Agostino, E. Gamalero, V. Gianotti, M. Bottaro, M. C. Gennaro et G. Berta (2010). Use of arbuscular mycorrhizal fungi and beneficial soil bacteria to improve yield and quality of saffron (*Crocus sativus* L.). *Acta Horticulturae* **850**: 159-164.
- Alam, A. (2007). Status and prospects of mechanization in saffron cultivation in Kashmir. *Acta Horticulturae*(739): 383-388.
- Arslan, N., B. Gurbuz, A. Ipek, S. Ozcan et E. Sanhar (2007). The effect of corm size and different harvesting times on saffron (*Crocus sativus* L.) regeneration. *Acta Horticulturae*(739): 113-117.
- Bayat, M., M. Rahimi et M. Ramezani (2016). Determining the most effective traits to improve saffron (*Crocus sativus* L.) yield. *Physiology and Molecular Biology of Plants* **22**(1): 153-161.
- Behzad, S., M. Razavi et M. Mahajeri (1990). The effect of mineral nutrients (NPK) on saffron production. *Acta Horticulturae*(306): 56.
- Boonekamp, P. M. (1997). The role of external factors in growth and development of flower bulbs and bulb-flowers: an update since 1992. *Acta Horticulturae* **430**: 35-43.
- CRAAQ (2010). Guide de référence en fertilisation. 2^{ème} édition **473**.
- Galavi, M., M. Soloki, S. Mousavi et M. Ziyaie (2008). Effect of planting depth and soil summer temperature control on growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Asian Journal of Plant Sciences*.
- Kianmehr, H. (1981). Vesicular—arbuscular mycorrhizal spore population and infectivity of saffron (*Crocus sativus*) in Iran. *New Phytologist* **88**(1): 79-82.
- Kumar, R., V. Singh, K. Devi, M. Sharma, M. K. Singh et P. S. Ahuja (2009). State of art of saffron (*Crocus sativus* L.) agronomy: A comprehensive review. *Food Reviews International* **25**(1): 44-85.
- Molina, R., M. Valero, Y. Navarro, J. L. Guardiola et A. Garcia-Luis (2005). Temperature effects on flower formation in saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae* **103** (3): 361-379.
- Molina, R. V., M. Valero, Y. Navarro, A. Garcia-Luis et J. L. Guardiola (2005). Low temperature storage of corms extends the flowering season of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* **80**(3): 319-326.
- Soonvald, L., K. Loit, E. Runno-Paurson, A. Astover et L. Tedersoo (2019). The role of long-term mineral and organic fertilisation treatment in changing pathogen and symbiont community composition in soil. *Applied Soil Ecology* **141**: 45-53.