Article publié dans Québec vert, no 359, 2024, pages 59-66

Une serre en matériaux recyclés et durables

par Patrick Brisebois, Ph. D., assistant de recherche et Claudiane Ouellet-Plamondon, Ph. D., professeure, École de technologie supérieure de Montréal

IMAGE GÉNÉRÉE PAR IA

Un vaste projet de développement de matériaux écologiques recyclés afin de créer des serres plus vertes et durables prend son envol. Des avancées qui modifieront le portrait du secteur serricole.

À l'École de technologie supérieure, la professeure Claudiane Ouellet-Plamondon, qui occupe la Chaire de recherche du Canada en matériaux de construction fonctionnels, travaille sur le développement de nouveaux matériaux polymères à partir de plastiques recyclés pour créer un modèle de serre adapté aux besoins des petites et moyennes entreprises agricoles au Québec. Son projet, intitulé « Nouveaux matériaux durables pour un modèle de serre commerciale au Québec dans une perspective d'économie circulaire », s'aligne sur les objectifs du gouvernement québécois visant à doubler la superficie des serres d'ici 2025[1].

Pour la professeure Ouellet-Plamondon, il est crucial de proposer des matériaux innovants, plus durables et mieux intégrés dans une économie circulaire, pour la construction des différents éléments de la serre, y compris le revêtement et la structure, ainsi que les dalles de béton. Son objectif est de concevoir un modèle de serre à partir de plastiques agricoles recyclés tel le polyéthylène offrant un retour sur investissement équivalent ou inférieur au coût actuel des serres de petite et moyenne taille, sur une période d'utilisation de 10 ans ou moins. De plus, les différents éléments seront conçus pour répondre aux normes du Code national du bâtiment du Canada applicable aux bâtiments agricoles[2].

De nombreux partenaires

Le projet de recherche est réalisé par une équipe d'étudiants aux cycles supérieurs supervisés par des professeurs, chercheurs et partenaires industriels. Pour son projet, la professeure O.-Plamondon a su rassembler des experts en génie mécanique et en fabrication additive de l'École de technologie supérieure (Éric David, Simon Joncas), en structure des bâtiments de l'Université de Sherbrooke (Nathalie Roy et Serge Parent), en bilan thermique pour bâtiment de ferme de l'Université Laval (Sébastien Fournel), et en agronomie de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA – Stéphane Godbout).

Professeure Claudiane Ouellet-Plamondon au département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure de Montréal

Également, les chercheurs académiques ont fait appel à des partenaires industriels partageant des expertises, ce qui permettra de concevoir des produits en harmonie avec les exigences de l'industrie et assurera le transfert du nouveau concept de serre aux usagers québécois. Le commanditaire le plus important du projet, Tessier – Fabricant de serres, apporte son expertise en conception et fabrication de la serre, en plus de son soutien financier. Tessier, représenté par Martin Bernier, participe activement au design de la serre pour répondre aux besoins de ses clients, en utilisant une structure fine pour minimiser l'ombrage. Le plasturgiste, la compagnie Carbosphère, s'est joint récemment à notre équipe. Son expertise dans le domaine des technologies de recyclage du plastique nous permettra de développer des éléments de structures et de revêtements durables à bon prix. Carbosphère a le pouvoir industriel pour fabriquer massivement les éléments que nous allons concevoir par extrusion. Par conséquent, son implication dans le projet est clé pour garantir le succès du design des produits finis.

Nous avons aussi recouru à la firme Gobeil-Dion et son vice-président Louis-Martin Dion pour son expertise au niveau de l'efficacité énergétique des serres. AluQuébec, représenté par François Racine, apporte son expertise sur les structures en aluminium qui pourrait être utilisé en combinaison du plastique pour renforcer la structure de la serre. L'Association Béton Québec (Luc Bédard) a un rôle consultatif sur les activités de recherche sur les serres et l'utilisation du béton. La Zone AgTech (Marilou Cyr) a l'expertise sur le transfert technologique et coordonne les activités de transfert vers d'éventuels preneurs. Le Groupe AGÉCO, représenté par la vice-présidente Julie-Anne Chayer, joue aussi un rôle de conseiller étant donné son expertise sur les serres. Le projet implique également des producteurs en serre québécois. Les Serres Verrier (Luc Verrier), les Serres Point du Jour (Robert Thérien) ainsi que Les Producteurs en Serre du Québec (PSQ), chapeauté par Marlène Thiboutot, veilleront au design de la serre qui répondra aux besoins réels des utilisateurs du Québec. Depuis le début du projet, d'autres organisations telles que la Coopérative horticole Groupex (Sébastien Cordeau), AgriRÉCUP (Christine Lajeunesse) et Québec Vert (Jean-Luc Poirier et Luce Daigneault) se sont ajoutées au partenariat pour leur expertise en approvisionnement et en circularité dans un contexte de durabilité.

Une serre en matériaux durables

Ensemble, les partenaires académiques, les associations et les industriels ont élaboré un projet et définit 7 objectifs et des livrables sur trois années leur permettant de concevoir la serre à partir de plastiques agricoles et recyclés. Le projet a débuté en 2022 lorsque le groupe a reçu le financement du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), du conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG, volet Alliance) et du Centre interdisciplinaire de recherche en opérationnalisation du développement durable (CIRODD). Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

1) caractériser les matériaux polymères pour le recouvrement et la structure des serres;
2) concevoir les éléments structuraux porteurs de la serre;
3) établir un modèle représentatif du comportement thermique des serres;
4) étudier le microclimat sur la croissance des végétaux;
5) concevoir de nouvelles dalles de béton pour les serres et évaluer leur impact environnemental;
6) étudier la faisabilité économique des matériaux polymères recyclés;
7) faire l'analyse de la circularité.

Le projet vise de nouveaux concepts de structure de serre modulaire et préfabriqués, adaptés pour les zones climatiques du Québec et du Canada. Les retombées attendues sont l'augmentation de la durée de vie utile des matériaux de revêtement de serre, le développement de nouveaux matériaux durables et de concepts de serre. Une réduction de l'utilisation de combustibles non renouvelables et des coûts de chauffage (pour une même production agricole) grâce à des matériaux écoénergétiques plus isolants est attendue. Le projet permettra un approvisionnement en matériaux favorisant la circularité et le recyclage, l'augmentation de la productivité par mètre carré ainsi que de nouveaux concepts innovants et commercialisables. Dans le contexte canadien, le projet de la professeure Ouellet-Plamondon est en adéquation avec le programme des technologies propres en agriculture, inscrit dans le cadre du plan climatique renforcé du gouvernement, favorisant un environnement et une économie sains[3]. Le projet contribuera à susciter les changements nécessaires pour parvenir à une économie à faible émission de carbone et à favoriser une croissance durable dans le secteur agricole et agroalimentaire du Canada. Le nouveau modèle de serre est en ligne avec la Politique alimentaire canadienne et aidera à soutenir la sécurité alimentaire dans les communautés autochtones et du nord du Canada[4]. Il devra permettre aux serriculteurs québécois et canadiens d'offrir des fruits et des légumes locaux tout en étant aussi compétitifs, en termes de coût et de diversité, que les produits importés.

PHOTO : ISTOCK

Les plastiques agricoles en chiffres

Selon Statistique Canada[5], 52 % de la superficie des serres au Canada estimée est en film plastique polyéthylène basse densité (PEbd), 46 % en verre et 2 % en plastique rigide. Les films plastiques sont surtout utilisés par les petites et moyennes entreprises, qui représentent 80 % des producteurs serricoles, et ils doivent être remplacés tous les 4 à 5 ans.

Selon des études récentes, plus de 62 000 tonnes de plastiques sont générées par l'agriculture au Canada dont 5 800 tonnes provenant uniquement du milieu serricole pour la culture des légumes en serre [6]. Pour le Québec, la quantité de plastique générée par l'agriculture est estimée à 11 000 tonnes annuellement, dont 70 % est composé de polyéthylène basse densité, et inclut 625 tonnes provenant uniquement des films en polyéthylène utilisés pour le recouvrement des serres[7]. Actuellement, le recyclage du PEbd agricole n'est pas une solution durable, car il dépend et varie selon les MRC au Québec. Ceci souligne la nécessité de faire usage de matériaux de serre ayant une plus longue durée de vie et d'avoir une boucle de récupération mieux établie.

Approvisionnement

Au Québec, l'approvisionnement en plastiques recyclés est orchestré par RECYC-QUÉBEC, les Chambres de commerce de Montréal, de Laval, des Laurentides et de la Montérégie. Ces organismes permettent de faire le lien avec les générateurs de plastiques locaux. Leur aide permet d'identifier les dépôts, la nature et la quantité des plastiques disponibles. Par exemple, à travers leur réseau de contact bien établi, Symbiose Montérégie a monté une liste des générateurs de la Montérégie qui participent volontairement au programme de responsabilité élargie des producteurs (REP). Pour le Canada, les plastiques agricoles sont inventoriés par AgriRÉCUP et sa présidente Christine Lajeunesse. Grâce à AgriRÉCUP et les coopératives agricoles telles que Groupex à Lévis, Novago à Joliette et Environek à Sainte-Marie, il est possible de localiser localement des milliers de tonnes de résidus de plastiques agricoles ou horticoles, sous forme de granules, de flocons et aussi sous leur forme brute, sans traitement. D'autres plastiques recyclés de source agricole, alimentaire et de post-consommation peuvent aussi être localisés chez des conditionneurs/recycleurs tels qu'EcoFib à Drummondville, Exxel Polymères à Bromont, CedLo à Farnham et Modix Plastiques à Lachute.

Figure 1. Images de : (A) pellicule de PEbd, (B) balles rondes de PEbd linéaire et (C) tubulure de PEbd métallocène (sources : UPA Chaudière-Appalaches, Récoltech et DSD international)[7].

TESSIER
FABRICANT DE SERRES
DEPUIS 1979

Experts-Conseil - Fabricant - Transport
Installation - Entretien

DÉCOUVREZ LA SERRE TYPE VENLO DE TESSIER

- **Productivité végétale accrue**
- **Serre professionnelle en verre**
- **Transmission maximale de lumière**

LE PARTENAIRE INCONTOURNABLE POUR VOS SERRES

Serres individuelles et jumelées

Tunnels chenilles classiques et gothiques

Recouvrement (Polyéthylène, polycarbonate, verre)

Toiles à Ombrager

Ventilation VAF et HAF

Couvre-sol (Polypropylène tissé)

Tables de culture inondables et mobiles

1-888-797-3616

CULTIVEZTESSIER.COM

TESSIER
FABRICANT DE SERRES
DEPUIS 1979

PHOTO : ISTOCK

Contrôles de la qualité

La stratégie locale d'approvisionnement a permis à l'équipe de la professeure O.-Plamondon de récupérer plusieurs dizaines de kilogrammes d'échantillons de plastiques tels que du polyéthylène basse densité (linéaire et métallocène), du polyéthylène moyenne et haute densité, du polyéthylène téréphtalate, du polypropylène et du polystyrène. Ensuite, les matériaux recyclés ont été soumis à un protocole d'inspection et du contrôle de la qualité pour identifier les sources de plastiques aux propriétés constantes. Tout d'abord, les plastiques décontaminés de sources agricoles et récupérés sous la forme de granules ou de flocons ont été favorisés. Par suite d'une inspection visuelle, les flocons de plastiques qui contenaient des impuretés telles du papier et des morceaux d'étiquettes encore présents ont été rejetés. Ensuite, certains produits ont été mis de côté à cause de l'odeur forte qu'ils dégageaient.

Jusqu'à maintenant, nous avons ressourcé plus de 12 produits recyclés et identifié 4 plastiques à base de polyéthylène avec des propriétés constantes qui ont le potentiel recherché pour la fabrication des poutres de structures. Les quatre produits identifiés sont : le polyéthylène basse densité noir (Modix), le polyéthylène basse densité linéaire blanc (Modix), le polyéthylène basse densité métallocène bleu (Environek), et le polyéthylène moyenne densité noir (Environek). Ces matériaux ont été soumis à des analyses chimiques et physiques plus approfondies pour déterminer leur pureté et leurs propriétés physico-chimiques. Pour être acceptés dans le programme de revalorisation, les plastiques ont été soumis aux analyses thermogravimétriques (ATG) et calorimétriques à balayage différentiel (CDB) pour déterminer la présence de résidus après dégradation thermique et le point de fusion des polymères respectivement. Ensuite, les spectroscopies infrarouge à transformée de Fourier (IR-TF) et de rayons X à dispersion d'énergie (SDE) ont été utilisées pour identifier les groupements fonctionnels des polymères et valider l'absence d'éléments toxiques tels que les métaux lourds (cadmium, mercure, arsenic, plomb, etc.) dans les plastiques ressourcés. Aussi, la mesure de la densité des polymères a été évaluée à l'aide de la technique d'Archimède qui consiste à mesurer la densité d'un objet (granule) à l'aide de la technique de flottaison. Les analyses ont été effectuées en triplicata par un étudiant de maîtrise et un stagiaire postdoctoral à l'ÉTS. Les données obtenues ont été comparées statistiquement avec les propriétés des matériaux vierges correspondants. Tous les matériaux retenus (figure 2) ont montré des propriétés avec moins de 5-7 % d'écart aux valeurs des matériaux vierges. Les résultats du contrôle de qualité ont indiqué que les plastiques agricoles présentaient généralement une stabilité thermique et une pureté chimique comparables à celles des matériaux vierges. Toutefois, le polyéthylène linéaire de faible densité (LDPE-L) contenait environ 4 % du pigment blanc TiO_2, détecté par EDX, et présentait des signes de dégradation oxydative due à une utilisation antérieure, comme l'a révélé l'IR-TF.

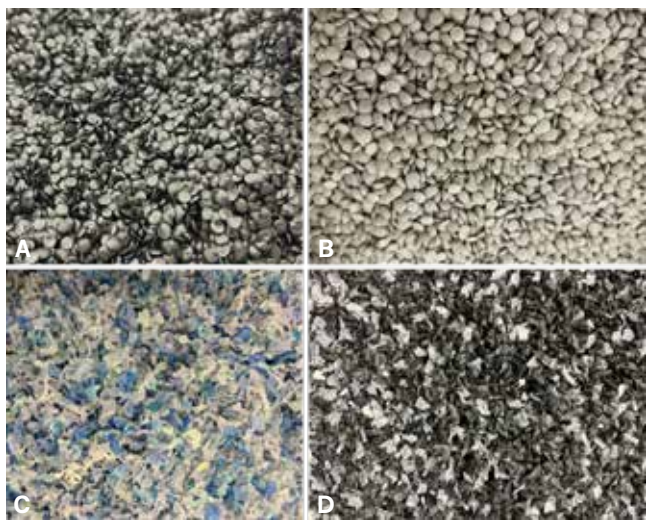

Figure 2. Images des plastiques agricoles retenus par le processus du contrôle de la qualité : (A) polyéthylène basse densité (Modix); (B) polyéthylène basse densité linéaire (Modix); (C) polyéthylène basse densité métallocène (Environek) et (D) polyéthylène moyenne densité (Environek).

Formulation de matériaux composites

Les 4 polymères recyclés retenus par le processus du contrôle de la qualité (figure 3) ont été utilisés pour former des composites par extrusion en les mélangeant avec du polypropylène (PP) et des fibres de verre (FV). Les nouveaux matériaux composites sont 100 % recyclés et contiennent au moins 50 % de PE de source agricole. Des mesures de rhéologie ont permis de mesurer la viscosité de ces matériaux composites et d'assurer leur propriété d'écoulement pour former des objets par extrusion, par moulage par injection (figure 4) ou impression 3D.

Figure 3. Images des spécimens de composites obtenus par moulage par injection (composition : PEbd-M 50 %, PP 35 % et FV 15 %).

Tests mécaniques

Ces nouveaux matériaux ont été transformés en spécimens expérimentaux (figure 3) et leurs propriétés mécaniques (traction, flexion et impact) ont été déterminées selon les normes de la société américaine pour les tests et les matériaux (ASTM). En résumé, la formulation de composites légers (densité < 1g/cm^3) a permis d'obtenir des matériaux présentant de bonnes propriétés mécaniques, avec une résistance à la traction comprise entre 23 et 28 MPa et un module d'élasticité de Young allant de 1,8 à 2,6 GPa, comparables à ceux des composites à base de bambou et de nylon. Les tests statistiques ont permis de classer les quatre composites en deux groupes en fonction de leurs propriétés mécaniques : les composites ductiles basés sur le LDPE-L et le LDPE-M, et les composites cassants basés sur les matériaux LDPE et MDPE.

L'ajout de plus de renfort et d'autres types de fibres (carbone, nylon ou polypropylène) également de source agricole est prévu pour augmenter la résistance mécanique des composites. La valeur recherchée pour la résistance tensile des éléments est de 32 MPa. La figure 4 montre les fractures des spécimens après les tests mécaniques.

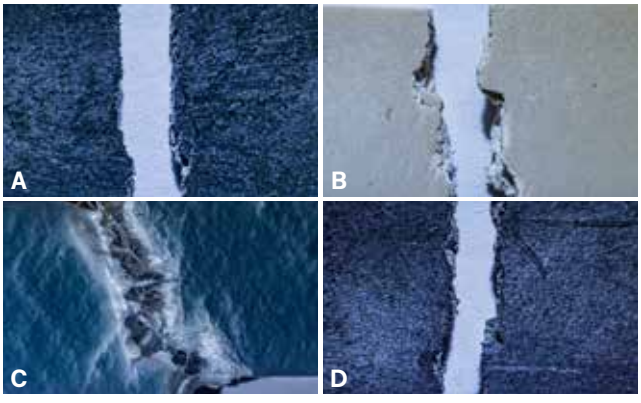

Figure 4. Images des fractures occasionnées par les tests de traction pour les composites à base de (A) PEbd, (B) PEbd-L, (C) PEbd-M et (D) PEmd.

Exposition aux UV

Bien que les plastiques PE et PP soient résistants aux UV et aux intempéries, ce qui les rend adaptés aux applications extérieures, ils peuvent présenter une photodécomposition en cas d'exposition prolongée au soleil pendant 2 à 3 ans. Pour déterminer la dégradation des matériaux, un vieillissement accéléré a été effectué avec une intensité lumineuse UVA de 302,6 W/m^2 à 50 °C selon les normes ASTM. Les échantillons ont été irradiés pendant huit (8) heures avec 4 heures d'obscurité en alternance de 12 heures, deux fois par jour, avec un pic d'émission à 340 nm. Il s'agit de la méthode la plus courante pour simuler les effets néfastes de la lumière solaire sur la plupart des plastiques utilisés en extérieur[8].

Les résultats des tests de vieillissement accéléré ont montré que les plastiques PE/PP recyclés étaient sensibles aux changements de couleur, à la photo-oxydation et aux modifications des propriétés de résistance à la traction. Les composites ductiles blancs et bleus ont montré des changements de couleur significatifs et une légère diminution de la résistance à la traction sans changement d'élasticité après le vieillissement. En revanche, les composites noirs cassants ont présenté une légère perte d'intensité de la couleur, mais ont montré une augmentation notable de la résistance tensile à environ 30 MPa. Leur élasticité a connu une baisse significative d'environ 10 % après l'exposition aux UV. Selon nos calculs, la dose d'UVA à 340 nm reçue lors de l'expérience en chambre environnementale (56 jours) est équivalente à la dose d'UVA reçue pendant 4 ans d'exposition à la lumière naturelle du soleil au Québec. Ces résultats suggèrent que les composites noirs à base de PEbd et PEmd recyclés, lorsqu'ils sont correctement traités et renforcés, sont des matériaux viables pour des applications de construction durable, en particulier dans des environnements qui nécessitent un équilibre entre la performance mécanique et la sécurité environnementale.

Polymère de recouvrement

D'un point de vue optique, nous avons évalué le comportement de filtration des matériaux de recouvrement de serres sur le spectre d'émission du soleil, soit : les ultraviolets, les rayonnements photosynthétiquement actifs et les infrarouges. Ces mesures ont été effectuées par le chercheur Bill Baloukas en génie physique à l'école Polytechnique de Montréal. Les résultats ont servi à établir le bilan thermique d'une serre type dôme et serviront à comparer les performances de notre recouvrement d'acrylique transparent recyclé à double paroi.

Pour mesurer les performances en isolation de nos matériaux, nous avons sélectionné la capacité thermique et la conductivité thermique. Pour ce, nous avons construit un dispositif expérimental à l'aide d'un thermocouple et d'un capteur de flux thermique. Les matériaux testés sont les suivants :

- panneaux d'acrylique (Acrylite) double paroi 8 mm d'épaisseur;
- panneaux de polycarbonate (PC) double paroi 8 mm d'épaisseur;
- film de polyéthylène (PE) Tufflite clair 0,15 mm (6 mil) d'épaisseur;
- film de polyéthylène (PE) Tufflite 0,15 mm (6 mil) d'épaisseur;
- verre trempé 4 mm d'épaisseur.

Modèle thermique

Jusqu'à maintenant, les mesures des propriétés optiques et thermiques des revêtements transparents conventionnellement utilisés pour les serres commerciales ont permis d'élaborer un modèle expérimental pour déterminer le bilan thermique d'une serre de type dôme (Université Laval). Le projet vise à évaluer par bilan thermique les économies d'énergie que pourraient engendrer de nouveaux recouvrements comme le polyméthacrylate de méthyle par rapport à une serre type en polyéthylène (PEbd) et d'obtenir des comparatifs entre les différents matériaux existants par le biais de la simulation énergétique. Les simulations ont pour but d'évaluer la disponibilité de l'énergie solaire comme source d'énergie de chauffage et pour la photosynthèse des plantes de même que l'énergie nécessaire pour chauffer une serre. Les simulations énergétiques ont été réalisées sur un programme développé en Python utilisant la programmation orientée objet qui permet de simuler des comportements d'objets réels. La programmation du code Python a nécessité une revue de littérature exhaustive des phénomènes thermiques et physiques ayant lieu dans les serres de sorte que le programme soit à jour par rapport aux connaissances scientifiques actuelles dans les serres.

À cette étape-ci, il a été déterminé qu'un bilan de chaleur en régime semi-statique, c'est-à-dire le besoin de chauffage évalué de façon horaire, était la meilleure option pour obtenir des résultats fiables et sans nécessiter de long temps de calcul. Par la suite, une prévalidation du modèle a été réalisée dans une serre de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

Fafard 1940

NOUVEAU
SEMENCES DE GAZON + NUTRIMENTS

PELOUSE 2X PLUS DENSE*

S'ÉTABLIT RAPIDEMENT EN QUELQUES SEMAINES*

PROCURE UN GAZON VERT & DENSE

CONTACTEZ-NOUS
1 800 667.2112 | FAFARD.CA

® / MC utilisées sous licence par Scotts Canada ltée. © 2024 Scotts Canada ltée. Droits mondiaux réservés.

*vs la Semence de gazon tout usage Scotts® Turf Builder®, lorsque les deux sont appliquées conformément au taux pour un sol dénudé, et lorsqu'utilisées selon le mode d'emploi et sous réserve des soins appropriés.

(IRDA) durant une semaine au mois de février. Les résultats ayant été concluants, le modèle a continué d'être développé pour tenir compte de facteurs typiques aux serres telles que l'évapotranspiration des plantes sous éclairage artificiel ou non. Aussi, le bilan de chaleur est donc à son étape de validation complète puisque des données climatiques et physiques détaillées ont été recueillies chez un producteur en serre de la région de Portneuf pour les besoins de chauffage avec une serre en double polyéthylène de tomates. À terme, une fois le programme validé avec les nouveaux matériaux recyclés, les besoins en chauffage de différents types de serres seront évalués.

Architecture

Nous devrons aussi considérer certains éléments architecturaux qui sont vitaux à l'implantation d'un modèle de serre qui sera accepté par les utilisateurs. Par conséquent, nous utiliserons des matériaux réfléchissants sur les surfaces internes de la serre pour maximiser la distribution de la lumière et nous choisirons un matériau de revêtement dans la conception du toit avec une bonne transmission de la lumière. Nous éviterons l'utilisation de matériaux qui diffusent, ce qui pourrait entraîner une répartition inégale de l'intensité lumineuse à l'intérieur de la serre. Aussi, nous allons déterminer la hauteur suffisante pour permettre une bonne distribution de la lumière dans toute la serre, car une serre trop basse pourrait provoquer un ombrage excessif, en particulier aux heures du matin et du soir. Les structures obstructives seront évitées et des structures légères et amincies pour réduire les zones d'ombrage seront favorisées. Un indicateur de succès sera d'obtenir une conception permettant l'utilisation de 95 % de la superficie interne de la serre pour fin de culture.

En conclusion

En complément, les stagiaires et les étudiants en structure de bâtiments (U. Sherbrooke) ont réalisé une revue de littérature, une analyse de coûts et l'analyse des charges d'une serre type selon le Code national du bâtiment et le Code agricole[2]. Les résultats des tests mécaniques obtenus à l'ÉTS serviront à concevoir les éléments de structure pour la serre à l'Université de Sherbrooke (2024-2025) en format réel.

Bientôt, nous prévoyons commencer la conception des dalles de béton aux propriétés phytosanitaires augmentées. Nous prévoyons inclure 15 % de plastiques recyclés comme agrégats pour diminuer l'empreinte écologique de l'industrie du ciment. L'idéalisation de notre projet aboutira à la construction d'une serre d'au minimum 240 pieds carrés qui sera construite sur les terrains de notre commanditaire principal à St-Damase : Tessier - Fabricant de serres. Dans la serre prototype, nous pourrons continuer l'étude amorcée à l'IRDA sur l'influence des nouveaux matériaux recyclés et du microclimat généré par la serre sur la croissance des végétaux.

Projet en partenariat avec :

références

1. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, « Croissance des serres au Québec », 2020.
2. G. du C. C. national de recherches Canada, Code national de construction des bâtiments agricoles : Canada : 1995 - Archives des publications du CNRC.
3. Environnement et Changement climatique Canada, Un environnement sain et une économie saine : Le plan climatique renforcé du Canada pour créer des emplois et soutenir la population, les communautés et la planète, 2020.
4. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Politique alimentaire pour le Canada, 17 novembre 2020.
5. Statistique Canada, « Tableau 32-10-0018-01 Estimation de la superficie totale des serres et mois en exploitation », 26 avril 2021.
6. K. Timmer, « Agricultural plastic characterization and management on canadian farms », Cleanfarms, Aug. 2021.
7. I. Charron, R.-M. St-Arnaud, et V. Veilleux, « Étude sur les plastiques agricoles générés au Québec », RECYC-QUÉBEC, 2019.
8. M. Frigione, A. Rodríguez-Prieto, Can accelerated aging procedures predict the long term behaviour of polymers exposed to different environments? *Polymers* 13 (2021) 2688.