



Programme de recherche et développement sur les serres maraîchères bioclimatiques et mobiles

État de l'art

Présentation d'une solution technique innovante

Rédigé par : **Gildas Véret**, Horizon Permaculture
avec le concours de Lauriane Mietton

Février 2017

SOMMAIRE

Programme de recherche et développement sur les serres maraîchères bioclimatiques et mobiles...	1
État de l'art.....	1
Présentation d'une solution technique innovante.....	1
<i>Résumé.....</i>	<i>4</i>
<i>Introduction.....</i>	<i>5</i>
<i>État de l'art.....</i>	<i>6</i>
Serres fixes classiques.....	6
Serre en verre type "chapelle".....	6
Serre plastique multichapelle.....	7
Serre plastique type "tunnel".....	8
Serre à ossature biosourcée.....	9
Serres mobiles.....	11
Enjeux de la mobilité des serres.....	11
Différentes techniques pour la mobilité.....	11
Serre mobile « lourde » sur rails fixes.....	12
Serre mobile « lourde » sans rails fixes.....	13
Serre mobiles « légères ».....	14
Serres bioclimatiques.....	15
Serre double paroi sous pression.....	16
Serre polycarbonate.....	17
Dispositif inertiel.....	17
Serre bioclimatique de type « bâtiment high-tech ».....	18
Serre semi-enterrée.....	19
Serre bioclimatique fixe type GERES.....	20
Tableau récapitulatif.....	22
<i>Nos objectifs.....</i>	<i>24</i>
<i>Notre innovation.....</i>	<i>25</i>
Conjuguer mobilité et bioclimatisme dans une logique permaculturelle.....	25
Une structure bois originale.....	25
Mobilité aisée.....	28

Efficacité thermique.....	29
Une double paroi transparente isolante.....	29
Inertie mobile.....	30
Hors gel sans chauffage ?.....	30
Efficacité écologique.....	31
Matériau bois.....	31
Bâches plastiques.....	31
Une serre adaptable à différents contextes.....	31
Mobilité latérale.....	32
Amélioration des conditions de travail du maraîcher.....	32
Diffusion en « Open source ».....	32
<i>Descriptif technique.....</i>	<i>33</i>
La forme.....	33
L'arceau bois treillis en I.....	33
Structure d'ensemble.....	36
Parois et inertie.....	36
Une solution évolutive.....	37
Analyse de risque : gestion par prototypes.....	37
<i>Annexes.....</i>	<i>39</i>
Quelques ouvrages de référence.....	39
Quelques fabricants de serres.....	39
CMF.....	39
SVL.....	39
JRC.....	39
RICHEL.....	39
Agrithermic.....	39
Précisions techniques concernant la serre bioclimatique mobile telle que conçue par Fermes d'Avenir.....	40

Résumé

Les serres sont des dispositifs très utilisés en maraîchage. Leur diversité est décrite dans le présent « état de l'art ». Les serres classiques, qu'elles soient en verre ou bâchées de plastique sont optimisées pour capter la lumière solaire, mais leur performance thermique (isolation, inertie) est médiocre. L'application de la conception bioclimatique, qui s'est développée en architecture durant les dernières décennies, aux serres de culture est une voie d'innovation dont nous présentons l'avancement. Une autre voie d'amélioration des performances des serres se concentre sur la mobilité, dans le but d'améliorer la santé des sols et de permettre l'optimisation des périodes d'utilisation de la serre dans l'année. Les différentes techniques développées en ce sens sont également présentées ci-dessous.

L'analyse des forces et faiblesses de ces différents types de serres nous amène à développer un modèle original fortement innovant. Les choix de conception visent à créer une structure adaptable à de nombreuses configurations et capable de répondre à différents besoins. Aussi nous proposons la construction et le test d'une serre bioclimatique mobile basée sur une structure bois originale (arceau bois treillis en I). La diffusion des plans et des retours d'expérience en « open source » permettra à de nombreux maraîchers de s'équiper. Le modèle présenté peut aisément être décliné en serre mobile simple ou en serre bioclimatique fixe, la combinaison de ces deux fonctions restant toujours possible. Les documents diffusés en « creative commons » permettront l'auto-construction par des maraîchers, tout comme la construction commerciale par des professionnels, Fermes d'Avenir ne conservant aucune propriété intellectuelle sur ce développement. Les modifications et améliorations sont favorisées par ce type de licence, ce qui permettra de prolonger et d'amplifier ce travail de Recherche & Développement.

La dernière partie de ce document présente la solution technique retenue. Des prototypes seront construits en mai-juin 2017. Ils permettront de valider certains choix constructifs ou d'apporter les modifications utiles avant construction du modèle complet. Une serre bioclimatique mobile sera construite sur la ferme de la Bourdaisière en septembre-octobre 2017. Elle sera testée en utilisation réelle par les maraîchers. Les retours d'expérience du chantier et de l'exploitation de la serre seront documentés et diffusés avec les plans et la notice de montage.

Introduction

L'objectif du travail de Recherche & Développement sur les serres mené par Fermes d'Avenir est de proposer une serre adaptée à la conduite du maraîchage biologique agro-écologique. Cela implique une efficacité accrue via l'optimisation des surfaces et du planning d'utilisation, un souci d'agradation des sols constant et un impact environnemental et écologique le plus neutre possible. Dans l'objectif d'en faire un outil aisément répliquable et facilement auto construit, une attention particulière est portée sur le choix de matériaux écologiques et peu onéreux dans un compromis réfléchi et réaliste.

Les serres sont en effet un élément important de la viabilité économique d'une ferme en maraîchage : elles permettent d'augmenter la production sur une petite surface en allongeant la période de croissance des plantes tout en protégeant les cultures des événements extérieurs (intempéries, animaux...).

En 2010 on recense 30 860 exploitations légumières (plein champ, maraîchage et serres) soit une baisse de 29% par rapport à 2000. Les cultures de plein champ y sont majoritaires avec 83% de la surface légumière contre 13% pour le maraîchage (plein champ et abris bas) et 4 % pour les serres. Néanmoins, cette dernière est en hausse de 7% par rapport à 2000 alors que la surface de plein champ accuse une baisse de 28%¹.

Il existe une multitude de serres différentes aux vues de leurs caractéristiques structurelles (dimensions, architecture) et techniques (mobilité, bioclimatisme, matériaux) diverses. Ces différences découlent de la variété des contextes et des utilisations avec des objectifs en termes d'efficacité thermique et d'impact écologique et environnemental. Le présent document présente ci-après un état de l'art et une analyse de cette diversité, en préambule d'une réflexion sur les innovations les plus stratégiques à développer en ce domaine.

La seconde partie décrit précisément les principes de construction d'une serre bioclimatique mobile, système innovant répondant aux enjeux définis en première partie.

¹ AGRESTE Les Dossiers N° 16 - JUIN 2013

État de l'art

Nous proposons dans un premier temps une revue de l'état de l'art des différents types de serres maraîchères. Une première partie est dédiée aux diverses serres fixes classiques et leurs variantes. Une seconde partie présente les serres mobiles. La troisième partie décrit la diversité des serres bioclimatiques. Nous n'aborderons pas les abris filets qui, complémentaires, ont d'autres objectifs. L'analyse de cette diversité est intégrée plus bas à la réflexion sur les innovations les plus pertinentes dans ce domaine.

Serres fixes classiques

Serre en verre type "chapelle"

La serre verre multichapelle, avec fondations au sol, armature métallique, toit plat supportant les feuilles de verre, à chapelles (module répété) de largeur variable selon les modèles (4 à 8m), avec des aérations par ouvrants alternés en toiture est un « classique » haut de gamme. Cette structure d'un coût très élevé est le plus souvent chauffée et consacrée à des cultures à haute productivité et menée en culture longue (tomate, poivron, concombre)².

Elle présente l'intérêt de permettre "un effet de serre" avec une absorption maximisée du rayonnement visible incident (90%) et une durabilité longue du fait de la stabilité du matériau. Le coût est souvent une limite pour l'installation d'une telle serre. Un poids important exclut toute mobilité et implique une charpente et des fondations lourdes. De ce fait les matériaux et l'énergie grise mobilisés pour l'installation de serres en verre sont importantes.



Illustration 1: Serre "chapelle" en verre ³

² CHAMBAGRI, *Fiche Maraîchage sous serre et sous abri*, 2008.

Avantages	Transmission optimale, longue durée de vie des surfaces transparentes (verre). Pas de toxicité des déchets en cas de déconstruction.
Inconvénients	Coût important. Forte énergie grise liée aux matériaux et à la construction, absence d'inertie thermique et d'isolation. Impact négatif sur la santé des sols.

Serre plastique multichapelle

La serre multichapelle plastique possède une armature métallique sur fondations au sol. Son toit est généralement cintré, recouvert d'un film plastique. Elle dispose le plus souvent d'ouvrants continus au faîtage ou à mi-pente. Ces structures sont soit menées en froid soit chauffées. Elles peuvent recevoir tant des cultures à fort développement (tomate, concombre) que de la salade³ ou autres cultures à cycle court.



Illustration 2: Serre multichapelle

Ces serres sont d'un coût nettement moindre que des serres chapelles en verre. Elles présentent également l'avantage d'être pratiques pour des cultures de maraîchage du fait de leur forme haute et droite comme l'on peut le voir sur l'illustration⁴. En multichapelles elles peuvent être déployées sur de grandes surfaces.

Néanmoins ces serres représentent un certain investissement avec un impact écologique liés aux déchets générés (durée d'utilisation d'une bâche : 2 à 5 ans) et à l'énergie grise de l'armature métallique. Elles sont parfois chauffées malgré leur faible inertie thermique et l'absence d'isolation ce qui entraîne d'absurdes consommations énergétiques et émissions de gaz à effet

³ CHAMBAGRI, *Fiche Maraîchage sous serre et sous abri*, 2008.

⁴ Site www.pepimat.com

de serre associées. Leur positionnement fixe engendre des conséquences sanitaires néfastes pour les sols.

Avantages	Faible coût, possibilité de couvrir des surfaces importantes
Inconvénients	Nécessité de fondations. Matériaux de faible durabilité (bâche plastique 2 à 5 ans) : génération de déchet. Énergie grise de l'armature métallique. Absence d'inertie thermique et d'isolation. Impact négatif sur la santé des sols.

Serre plastique type "tunnel"

C'est l'un des types de serres les plus répandus dans les exploitations maraîchères. Des arceaux en demi-lune forment son ossature pour constituer un tunnel de largeur au sol variant de 4,5 à 10 m, l'ensemble étant recouvert de bâches plastiques de 100 à 200 microns d'épaisseur. Les films sont généralement en polyéthylène (PE), en chlorure de polyvinyle (PVC) ou en d'autres copolymères. Des additifs permettent à ces films d'améliorer leur résistance UV ou leur capacité à réfléchir les rayonnements infra-rouge.

C'est en écartant manuellement ou de façon mécanisée ces laizes que l'on assure l'aération de la structure.

Ces tunnels sont le plus souvent cultivés à froid et sont des outils très adaptés à la culture de salade, de fraise et de légumes à faible développement. Ils peuvent recevoir des cultures de printemps, mais leur volume disponible (comparé aux chapelles) est une limite pour les cultures longues.

Souvent fixé au sol à l'aide de « pieds vrilles » (fixations amovibles), ce type de serre présente l'avantage d'utiliser des matériaux légers, de pouvoir être installé rapidement. La serre tunnel présente également un réel avantage financier par rapport à la matière "verre" précédente. Ses inconvénients sont la perte de transmission lumineuse des bâches dans le temps qui entraîne leur remplacement tous les 1 à 5 ans selon la qualité du revêtement, ainsi que la hauteur et le volume limités.

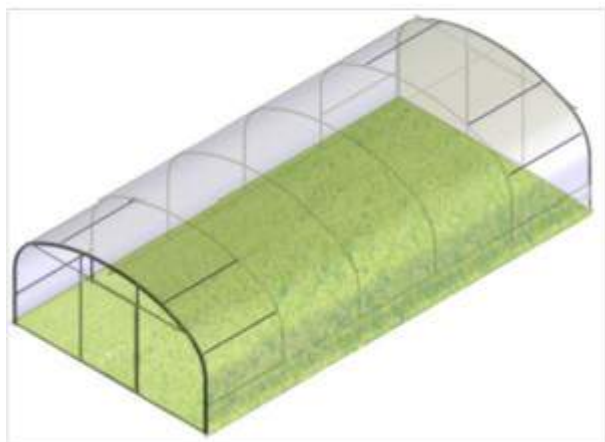


Illustration 3: Serre "tunnel"

Avantages	Facilité de mise en place, faible coût
Inconvénients	Matériaux de faible durabilité (bâche plastique 2 à 5 ans) : génération de déchet. Énergie grise de l'armature métallique. Absence d'inertie thermique et d'isolation. Impact négatif sur la santé des sols.

Serre à ossature biosourcée

Des variantes des serres ci-dessus sont parfois construites avec une ossature bois comme les serres en bambous en Asie ci-dessous. L'utilisation de matériaux biosourcés et locaux améliore le bilan carbone total et l'empreinte écologique de ces serres. Ces approches sont plus développées dans les pays à faible coût de main d'œuvre et à matière première naturelle abondante. Elle se développe néanmoins également dans les pays occidentaux. Ces structures en matières biodégradables, comme toute construction bois, demandent une grande précision de conception et de réalisation pour être durable dans le temps (gestion du ruissellement de l'eau notamment).



Illustration 5: Serre en bambou dans une ferme horticole écologique aux Philippines, Earth Flora Inc.



Illustration 4: Serre bois et verre du fabricant anglais Perity

Avantages	Faible énergie grise. Faible coût du matériau
Inconvénients	Technicité de la construction, temps de mise en œuvre

Serres mobiles

Enjeux de la mobilité des serres

En maraîchage biologique, les serres mobiles présentent de nombreux intérêts par rapport aux serres classiques fixes qui peuvent se résumer en trois optimisations majeures :

- - **Optimisation énergétique** : l'allongement de la période de culture avec la réalisation de trois cultures sous serre au lieu de deux dans l'année : une culture primeur est lancée sous serre. Dès la fin des période de gelée, la serre est déplacée au dessus de la parcelle suivante où l'on plante les tomates ou les aubergines tandis que les cultures primeurs finissent de mûrir à l'air libre. En août les cultures d'hiver sont implantées dans une troisième parcelle de plein champ que la serre viendra recouvrir peu avant les premières gelées.
- **Optimisation sanitaire** : les serres fixes créent un microclimat artificiel permanent⁵ et induisent une détérioration de la santé du sol qui se traduit par l'apparition de ravageurs et de maladies (ce qui amène parfois à traiter les sols par désinfection à la vapeur). A l'inverse, l'utilisation d'une serre mobile permet que le sol cultivé sous serre soit régulièrement soumis aux intempéries (pluie, gel...) ce qui favorise la santé de l'écosystème du sol. Ce point est d'autant plus essentiel en maraîchage biologique où la prévention des maladies est essentielle car on ne dispose pas de "traitements chimiques" en "curatif".
- **optimisation économique** : les optimisations précédentes contribuent directement à l'amélioration de la qualité et de la quantité de la production. De plus la mobilité des serres permet une meilleure gestion des rotations. L'exemple phare est celui de la culture des tomates, plante d'origine tropicale, qui doit être conduite en rotation de 4 ans pour éviter le risque de « corky root » (maladie rare mais très grave qui s'installe dans un sol pour de longues périodes). L'utilisation de serres classiques implique de ne planter en solanacées (tomate, aubergine, poivron) qu'un quart de la surface couverte pour respecter les 4 ans de rotations. Ceci pénalise le bilan économique car ces solanacées sont des cultures rentables. De ce fait, de nombreux maraîchers ne respectent pas la rotation de 4 ans, mais s'exposent ainsi à un risque rare mais grave. L'utilisation de serres mobiles sur 4 positions résout ce problème. On peut ainsi cultiver tous les ans des solanacées dans la même serre, mais sur des parcelles différentes. On améliore ainsi la rentabilité de la serre sans prendre de risque sanitaire pour l'exploitation⁶.

Différentes techniques pour la mobilité

La mobilité peut s'envisager selon différentes techniques et les principaux types de serres qui en découlent sont présentés ci-dessous :

⁵ Coleman Eliot, *Four Season Harvest*, 1999.

⁶ Pour en savoir plus : <https://www.fermesdavenir.org/outils/les-serres-mobiles/>

Serre mobile « lourde » sur rails fixes

La mobilité d'une serre type tunnel à ossature métallique « lourde » d'assez grande dimension est généralement assurée par des rails montés sur des fondations béton. On assure ainsi une bonne planéité des rails, ce qui facilite le déplacement.

Relativement à leur poids, elles sont relativement maniables et le changement d'emplacement peut être assuré soit à la main soit par un treuil.

Ces serres présentent l'intérêt de pouvoir couvrir 3 emplacements par an ce qui augmente de façon importante la période de culture.

Elles présentent toutefois l'inconvénient de nécessiter du béton (fondations), du plastique et du métal, ce qui dégrade le bilan écologique global de la serre. Un autre inconvénient est la nécessité de disposer d'une surface d'une longueur suffisante pour assurer les rotations.



Illustration 6: Serre mobile sur rails

L'atelier paysan lance des projets d'autoconstruction de serres mobiles sur rail de ce type. ⁷

⁷ <http://forum.latelierpaysan.org/serres-mobiles-retours-experiences-t3180.html>

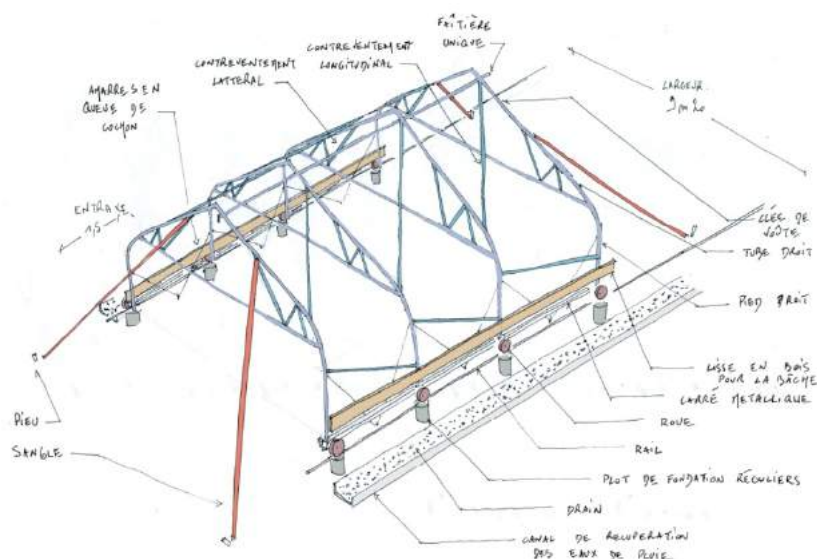


Illustration 7: Schéma d'une serre mobile - L'Atelier Paysan

Avantages	Mobilité : optimisation de l'utilisation, santé des sols
Inconvénients	Impact négatif des rails sur le sol, ancrage au sol nécessaire, énergie grise et fin de vie des matériaux, moindre réversibilité des installations (fondation béton).

Serre mobile « lourde » sans rails fixes

Cette option a été testée et éliminée à la ferme expérimentale de la Bourdaisière. En 2015 l'installation de deux serres mobiles a été confiée à De Bernard, professionnel reconnu d'installations maraîchères en région Centre. Ce prestataire a développé une solution technique originale qui s'est avérée inopérante : serre tunnel à armature métallique « lourde », mobile à l'aide de petites roulettes sur des rails métalliques amovibles posés au sol.

Les grandes difficultés rencontrées lors du déplacement des serres (déraillement à répétition, poids important des structures) amenèrent à modifier cette solution en installant des rails fixes sur plots bétons, ce qui complique la réversibilité des installations.

C'est fort de ce retour d'expérience que Fermes d'Avenir choisit de travailler à l'optimisation des solutions de mobilité, celles proposées par les professionnels locaux étant actuellement insuffisantes.

Avantages	Solution innovantes fournies par un prestataire
Inconvénients	Non fonctionnel

Serre mobiles « légères »

Solutions démontables

Nous pouvons ici citer l'exemple des serres démontables utilisées par Jean-Martin Fortier. Des serres ajustées de 20 m de long sur 2m de haut et 3,70 de large qui sont démontables en 2h par deux personnes.

Elles ont donc l'avantage d'être facilement démontables mais sont moins robustes que des serres fixes. L'ancrage est également moins résistant à des vents violents que l'ancrage sur plots béton des serres sur rails.

Solutions portables

Dans cette catégorie nous retrouvons également l'ensemble des très petites serres en plastique qui ont l'avantage d'être très légères, maniables, auto-construites. Leur inconvénient est évidemment leur taille qui limite la surface de culture et convient davantage à une activité potagère non commerciale.



Illustration 8: Serre mobile légère

Avantages	Très mobile, écologique
Inconvénients	Taille restreinte, fragile

Serres bioclimatiques

Si l'on reprend la définition, le terme « bioclimatique » se dit d'un habitat dans lequel la climatisation est réalisée en tirant le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation naturelle de l'air.⁸ La conception bioclimatique a été développée pour l'architecture de maisons passives. Ces concepts s'appliquent également à la conception de serres mais les techniques doivent être adaptées. Une serre bioclimatique ou "solaire passive" permet donc de capter et de stocker de la chaleur (le jour) et de la restituer quand les températures chutent (nuit) par conduction et convection⁹. Elle permet d'apporter une alternative écologique à l'utilisation de chauffage de la serre.

Afin d'améliorer le bilan thermique d'une serre, **trois points clés peuvent être optimisés** :

- **l'inertie** permet le stockage puis la restitution de la chaleur : la capacité de la serre à emmagasiner de la chaleur la journée et à restituer cette chaleur stockée durant la nuit est directement liée à la masse importante de matière non isolante (terre, pierre, eau, métal...) placée dans la serre et à la géométrie (exposition au soleil, maximisation des surface d'échange avec l'air).
- **l'isolation** permet de ralentir le refroidissement nocturne. Alors que le double vitrage est devenu une norme minimale pour les bâtiments, on conçoit que l'isolation d'une serre fermée uniquement par un film plastique de 200 microns peut et doit être améliorée.
- Des **apports solaires** maximisés sont indispensables au bioclimatisme. Sur ce plan, les serres sont généralement performantes. Une attention doit néanmoins être portée sur l'emplacement de la serre pour éviter tout masque solaire d'hiver quand le soleil reste sous les 20° au dessus de l'horizon. Naturellement, une serre bioclimatique recevant l'ombre de grands arbres en hiver verrait sa performance chuter, ce qui rendrait la démarche peu sensée.

Les avantages des serres bioclimatiques par rapport aux serres classiques sont multiples :

- **Optimisation écologique** : Pour permettre des cultures tout au long de l'hiver, il faut éviter qu'il ne gèle dans la serre. Aujourd'hui, la principale technique mise en œuvre avec une serre classique est le chauffage. Pourtant l'architecture bioclimatique appliquée aux serres permet de créer des serres beaucoup plus performantes sans avoir à brûler de fioul ou de gaz.
- **Optimisation des conditions de culture** : la serre bioclimatique permet de réduire le différentiel de température avec la restitution de chaleur des éléments d'accumulation soutenue par une aération maîtrisée (ventilateurs et ouvertures). Les cultures bénéficient

⁸ Larousse.

⁹ Ces concepts sont plus largement développés dans l'ouvrage de Lorentz-Ladener Claudia, *Construire une serre : Serres solaires passives, conception, exemple de réalisation*, Ulmer, 2013.

ainsi d'un environnement plus homogène et propice à leur croissance et à leur production hiver comme été.

- **Optimisation économique** : l'optimisation écologique qui contribue à réduire la consommation d'énergie et l'optimisation des conditions de production permet une meilleure rentabilité économique.

Serre double paroi sous pression

Ces serres améliorent l'isolation en bloquant une couche d'air (isolant) entre une paroi externe et une paroi interne. Très utilisée en maraîchage conventionnel sur grande surface, cette solution est généralement basée sur serres plastique multi-chapelle ou multi-tunnel. Elle est adaptée pour des grands volumes.

Elle présente cependant l'inconvénient d'utiliser de l'énergie et des machines pour maintenir sous pression l'air compris entre les deux parois. Elle se combine également souvent avec un chauffage de la serre, ce qui conduit à une empreinte carbone élevée.

Elle ne peut également pas être prévue en auto construction. Sa maintenance est compliquée et le rayonnement transmis est diminué donc elle perd en efficacité de transmission de l'énergie lumineuse (10% des rayons incidents)

Son coût d'investissement est attractif par rapport à une serre en double vitrage (quasi inexistante en raison du coût) mais reste important.



Illustration 9: Serre à toiture en double parois sous pression - ZI Boitardière Amboise

Avantages	Coût avantageux / double vitrage,
Inconvénients	Haute technicité, consommation élevée d'énergie grise, coût élevé, maintenance difficile (étanchéité long terme), diminution du rayonnement transmis (opacité)

Serre polycarbonate

Ces serres utilisent des panneaux de polycarbonate alvéolés comme surface transparente. L'épaisseur et l'air emprisonné dans ces panneaux leur confèrent des propriétés isolantes. Si l'utilisation de polycarbonate ne suffit pas à assurer le bioclimatisme (il faut ajouter de l'inertie), c'est une solution simple pour constituer des parois transparentes dotées d'un pouvoir isolant. Son coût et sa performance sont nettement supérieurs aux simples bâches plastiques mais nettement inférieurs au double vitrage et au simple vitrage auquel il est parfois substitué.



Illustration 10: Exemple de serre polycarbonate

Avantages	Coût avantageux / vitrage, paroi transparente isolante, légèreté et facilité de mise en œuvre
Inconvénients	Coût/ bâche simple, perte de transparence des panneaux dans le temps : génération de déchets lors du changement des panneaux.

Dispositif inertiel

Les exemples ci-après montrent des murs nord construits « en dur » (béton, pierre, terre), ce qui constitue de la masse thermique (pourvu qu'ils soient isolés par l'extérieur). Quand ce n'est pas le cas comme dans les serres plastiques présentées dans les précédents paragraphes,

l'amélioration de l'inertie peut se faire en ajoutant de la masse à l'intérieur de la serre, le plus souvent sous forme de réserve d'eau. Cette inertie permet de stocker des calories puis de les libérer et limite ainsi l'amplitude thermique dans la serre.

Ce type d'approche a l'avantage d'être indépendant de la construction et peut même être réalisé à posteriori. Par contre, elle mobilise une part de la surface intérieure de la serre qui ne peut pas être cultivée.



Illustration 11: Des barils métalliques noirs remplis d'eau ajoutent de l'inertie thermique à cette serre.

Avantages	Indépendant des techniques constructives.
Inconvénients	Diminue la surface cultivable.

Serre bioclimatique de type « bâtiment high-tech »

Ce type de serre est construit comme une maison passive optimisée pour la culture. Les matériaux et équipements sont donc haut de gamme par rapport à ce qui est habituellement utilisé en agriculture. Il s'agit d'installations très performantes dont le coût est très élevé.

Dans l'exemple de Bill Swan en Colombie britannique (Canada)¹⁰ ci-dessous, un mur nord et un toit isolé, des capteurs solaires thermiques et photovoltaïques et un système de stockage de

¹⁰ <http://www.greenenergyfutures.ca/episode/73-passive-solar-greenhouses>

chaleur estivale dans le sol par circulation de fluides dans et sous une dalle béton, permettent de maintenir 20°C dans la serre quand il gèle en hiver sans consommation d'énergie.

Ces systèmes techniques impliquent une complexité de construction et des coûts associés plus proches de ceux d'une maison que d'une serre classique. Néanmoins, une fois l'investissement réalisé, ce type d'installation a une longue durée de vie et fonctionne uniquement à l'énergie solaire avec une performance largement équivalente aux serres chauffées.



Illustration 12: Serre bioclimatique High-Tech

Avantages	Très grande efficacité thermique (inertie, isolation, stockage), durabilité
Inconvénients	Haute technicité, énergie grise élevée (dalle béton), coût élevé

Serre semi-enterrée

La serre semi-enterrée permet de bénéficier de l'inertie du sol (masse de terre) pour éviter les grands écarts de températures tels qu'il peut y en avoir en mi-saison avec une journée ensoleillée et une nuit claire. Généralement de petite taille, cette serre peut être pensée adossée à un habitat ou seule.

Elle présente donc l'avantage important d'éviter les pics de température et notamment une température inférieure à 0°C. Elle a l'inconvénient néanmoins de nécessiter d'importants travaux de terrassement et de bénéficier qu'à un petit volume. De plus, sa géométrie diminue l'éclaircissement des cultures en hiver quand le soleil est bas.



Illustration 13: Serres semi enterrées

Avantages	Bonne efficacité thermique (l'inertie limite les variations de température), écologique
Inconvénients	Coûts élevés des travaux (terrassement), surface limitée, éclairage diminué

Serre bioclimatique fixe type GERES

GERES ou GROUPE ÉNERGIES RENOUVELABLES, ENVIRONNEMENT ET SOLIDARITÉS est une association internationale composée d'une équipe de salariés et de volontaires qui travaillent ensemble sur le développement de solutions énergétiques renouvelables et adaptées aux contraintes locales.

GERES a beaucoup travaillé sur les serres bioclimatiques pour des régions soumises à des conditions climatiques extrêmes, notamment la Mongolie. La serre type GERES est une serre de petite taille avec des fondations souvent enterrées, qui présente une face transparente (le plus souvent à double paroi plastique non-pressurisée) et des murs en parpaing isolés par l'extérieur qui ont le rôle de stocker la chaleur la journée pour la restituer la nuit.

Cette serre a l'avantage de présenter une haute performance énergétique et de permettre facilement l'autoconstruction. Néanmoins l'énergie grise de construction est élevée (utilisation de parpaing en béton). De petite taille, elle est à privilégier dans des conditions où le climat rude nécessite une isolation et une inertie importante pour les cultures.



Illustration 14: Serre bioclimatique GERES en Mongolie

Avantages	Performance énergétique, autoconstruction aisée, coût limité
Inconvénients	Taille restreinte, consommation élevée d'énergie grise, investissement (temps ou monétaire) pour la construction

Tableau récapitulatif

Type de serre	Mobilité	Catégorie de taille	Armature la plus courante	Revetement le plus courant	Éléments d'isolation	Points forts	Points faibles
Serre verre type "chapelle"	fixe	grande	métal	verre		durée de vie des surfaces transparentes (verre), pas de toxicités des déchets en cas de	matériaux et à la construction, absences d'inertie thermique et d'isolation, Impact négatif sur la santé des sols.
Serre plastique multichapelle	fixe	petite	métal	plastique		Faible coût, possibilité de couvrir des surfaces importantes.	durabilité (2 à 5 ans pour les bâches en plastique) et génération de déchets, énergie grise de l'armature métallique, absence d'inertie thermique (bâches en plastique) et génération de déchets, énergie grise de l'armature métallique, absence d'inertie thermique et d'isolation, impact négatif
Serre plastique type "tunnel"	fixe	grande	métal	plastique		Facilité de mise en place, faible coût.	énergie grise de l'armature métallique, absence d'inertie thermique et d'isolation, impact négatif
Serre tunnel en ossature renouvelable	fixe	grande	bois	plastique		Faible énergie grise, faible coût du matériau.	Technicité de la construction, temps de mise en œuvre.
Serre mobile sur rails fixes	mobile	grande	métal	plastique		Optimisation de l'utilisation par la mobilité, santé des sols préservée.	nécessaire, énergie grise et fin de vie des matériaux, moindre réversibilité des installations (fondations en béton).
Serre "lourde" sans rails fixes	mobile	grande	métal	plastique		Solution innovante fournie par un prestataire	Non fonctionnel
Serre mobile sans rails	mobile	petite	bois	plastique		Très mobiles, écologique	Taille restreinte, fragile.
Serre double paroi sous pression	fixe	grande	métal	plastique	double revêtement	Coût avantageux par rapport au double vitrage.	Haute technicité, consommation élevée d'énergie grise, coût élevé, maintenance difficile (étanchéité long terme), diminution du rayonnement transmis (opacité)
Serre polycarbonate	fixe	grande	métal	polycarbonate	air emprisonné dans les panneaux alvéolés	Coût avantageux / vitrage, paroi transparente isolante, légèreté et facilité de mise en œuvre	Coût/ bâche simple, perte de transparence des panneaux dans le temps : génération de déchets aux changements des panneaux.
Dispositif inertiel	fixe	grande	métal	plastique	Résevoirs d'eau	Indépendant des techniques constructives.	Diminue la surface cultivable.
Serre bioclimatique high-tech	fixe	grande	métal	plastique	double revêtement, murs isolants	Très grande efficacité thermique (inertie, isolation, stockage), Durabilité	Haute technicité, énergie grise élevée (dalle béton), coût élevé
Serre semi-enterrée	fixe	petite	bois	verre	semi-enterrée	Bonne efficacité thermique (l'inertie limite les variations de température), écologique	Coûts élevés des travaux (terrassement), surface limitée, éclairage diminué
Serre bioclimatique fixe type GERES	fixe	petite	bois	verre	murs isolants	Performance énergétique, autoconstruction aisée, coût limité	Taille restreinte, consommation élevée d'énergie grise, investissement (temps ou monétaire) pour la construction

Tableau 1 : Avantages et inconvénients du verre et du plastique¹¹

	Avantages	Inconvénients
Verre	<ul style="list-style-type: none"> Meilleure transmission de la lumière Pertes de chaleur minimisées Durabilité Fin de vie : aucun déchet toxique Esthétique 	<ul style="list-style-type: none"> Matériau cher A changer en cas de casse Lourd, non déformable : pas de mobilité possible Nécessitant une structure porteuse dimensionnée pour le poids du verre : plus de matériaux, plus coûteux
Plastique (PE)	<ul style="list-style-type: none"> Peu coûteux Facile à remplacer/ réparer Léger et souple 	<ul style="list-style-type: none"> Moindre transmission lumineuse : captation de l'énergie moins efficace Temps de vie limité Fragilité au vent Création régulière de déchets plastiques non biodégradables

¹¹ manuel-construction-solar-greenhouse-2003

Nos objectifs

Fermes d'Avenir se consacre à faciliter la transition vers une agriculture écologique, notamment en développant et diffusant les approches qui renforcent l'équilibre économique des pratiques de maraîchage agroécologique.

L'utilisation de serres mobiles ou bioclimatiques s'inscrit dans cette perspective. Comme l'état de l'art ci-dessus le présente, ces deux approches permettent d'accroître la production d'une serre et donc d'améliorer son bilan écologique et économique.

Il nous semble néanmoins que les différents « modèles disponibles » de ces serres innovantes peuvent encore être améliorés. Notre expérience à la Ferme de la Bourdaisière avec des serres mobiles installées par des professionnels et la visite de diverses serres bioclimatiques a renforcé cette conviction.

Aussi, nous allons concevoir, réaliser, tester et améliorer des serres d'un type nouveau, conjuguant mobilité et bioclimatisme.

Notre serre doit allier les atouts de la serre bioclimatique (isolation, inertie thermique) avec la mobilité, tout en proposant une construction simple et écologique.

Il est essentiel que le modèle développé soit réalisable en auto-construction. Ainsi les maraîchers souhaitant installer ce type de structure ne seront pas freinés par l'absence de professionnels à même de vendre ce type d'installation. Ce peut être aussi un moyen de limiter les investissements initiaux qui sont souvent des freins à l'installation. Néanmoins ces stratégies d'auto-construction des installations maraîchères doivent être abordées avec prudence. Kevin Morel, dans sa thèse¹² sur le sujet a montré que le surcroît de temps dévolu aux installations pèse souvent plus sur les années de lancement que le remboursement d'un emprunt. Les maraîchers qui trouveront des professionnels à même de réaliser ce type d'ouvrage pourront bien entendu utiliser gratuitement les plans et instructions de montage et n'acheter que la réalisation.

Des plans et une notice de montage en « open-source »¹³ seront donc produits après test du premier prototype et largement diffusés via le site de Fermes d'Avenir.

Plusieurs choix techniques s'offrent à nous notamment concernant la taille, l'architecture, les matériaux utilisés. Nous détaillons notre analyse technique dans les paragraphes suivants.

Nos choix visent à proposer un modèle de serre très polyvalent, qui puisse être installé dans un grand nombre de configurations variées (orientation N/S ou E/W, longueur disponible pour la mobilité, accent mis sur la mobilité, sur le bioclimatisme ou les deux). Le modèle de base proposé sera donc adaptable à différents besoins de manière à faciliter sa diffusion, son utilisation et donc son amélioration et son évolution dans une logique « open source ».

12 Viabilité des microfermes maraîchères biologiques, thèse de Kevin Morel, Sad-apt, INRA, prochainement téléchargeable en ligne. <http://www.agroparistech.fr/podcast/Viabilite-des-microfermes-maraicheres-biologiques-These-de-Kevin-Morel.html>

13 Plans disponibles en ligne, utilisables gratuitement, sans droits d'auteur, toutes modifications autorisées dans la mesure où la nouvelle conception est diffusée dans les mêmes conditions, selon la licence « Creative Commons »

Notre innovation

Conjuguer mobilité et bioclimatisme dans une logique permaculturelle

Le modèle que nous développons est innovant en ce qu'il conjugue mobilité et bioclimatisme (qui généralement s'excluent l'un l'autre) grâce au développement d'une structure originale (arceau bois en poutre treillis/lamellé collé en I). Le choix du matériau bois et la possibilité d'une auto construction aisée sont également des caractéristiques novatrices.

Une structure bois originale

Les grandes innovations technologiques sont rarement des « inventions » mais bien souvent le fruit du transfert d'un concept connu dans un domaine où il n'était pas appliqué.¹⁴ La « poutre treillis » est un classique des structures métalliques devant relever le double défi de la solidité et de la légèreté : les grues des chantiers et les structures démontables des scènes de festivals en témoignent. Ce type de structure joue sur les mêmes principes que les poutres en I (transformer un effort de cisaillement en traction et compression) dont le succès dans le bâtiment est bien connu (IPN, IPH...) Il est notable que ces poutres en I, fréquentes en métal, existent également en bois, les lois de mécanique des matériaux s'appliquant bien sûr au métal comme au bois.

Par ailleurs, la voûte est une géométrie bien connue pour sa stabilité et la répartition des efforts. Son succès initial dans l'architecture de la pierre (compression pure, pas de contrainte de traction possible) ne s'est pas démenti avec le métal. Le procédé du lamellé-collé a permis son application au bois.

Le croisement de toutes ces approches permet de proposer un arceau de serre tunnel (semi-circulaire) en créant une « poutre treillis courbe » utilisant les techniques du lamellé-collé. Ce type de structure a l'avantage d'une grande robustesse (poutre treillis ou en I) et d'une grande légèreté (économie de matériau, faible densité du bois). L'utilisation du bois allège le bilan écologique (faible énergie grise) et permet une auto-construction aisée.

Ce type de structure, quoique extrêmement rare dans le monde agricole, a déjà été testé par Amethyst Farm¹⁵, à Amherst aux États-Unis.

14 Sur les stratégies d'innovation, voir, entre autres, les travaux de Bruno Latour, notamment dans *Pasteur : guerre et paix des microbes*. Il y décrit comment la carrière de Pasteur est constituée d'une suite de « déplacements » : changement régulier de discipline, transfert des concepts et des méthodes de la cristallographie à la fermentation puis à la biochimie en passant par la médecine vétérinaire. « Un tel schéma permet de comprendre aussi ce mélange d'audace et de traditionalisme [...], c'est en associant qu'il innove. »

15 <http://amethystfarm.org/many-hand-farm-corps/photo-album/greenhouse.html>



Illustration 15: Serre double paroi à armature bois, Amethys Farm



Illustration 16: grue : archétype de structure légère et robuste basée sur la poutre treillis



Illustration 17: Les structures de poutre treillis et de profilé en I fonctionnent aussi en bois



Illustration 18: La méthode du lamellé-collé permet de créer des structures courbes en bois

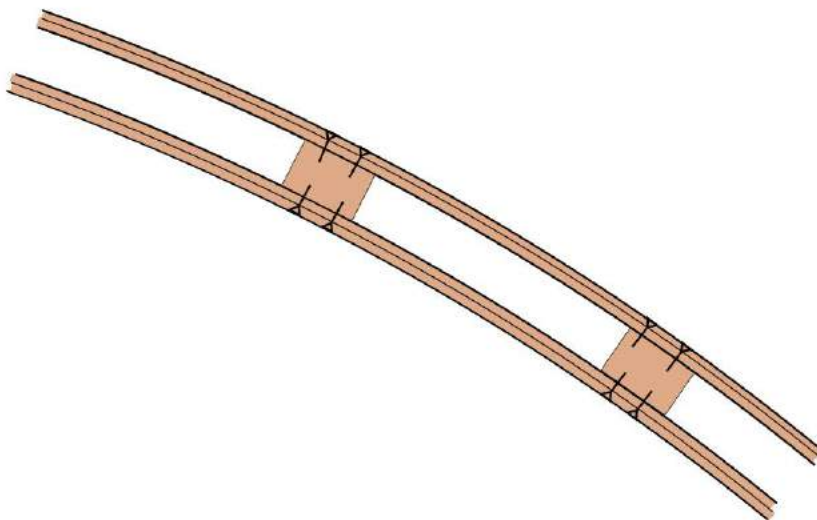


Illustration 19: principe constructif d'un arceau de bois « treillis en I » proposé par Fermes d'Avenir

En adaptant les échantillonnages et les assemblages de ce type d'arceau, on peut créer des structures beaucoup plus robustes que celle d'Amethyst Farm tout en conservant un devis de poids léger.

Mobilité aisée

L'arceau bois-treillis en I permet d'obtenir une structure résistante exceptionnellement légère ! Cette légèreté est un atout important. Elle nous permet de déplacer la serre sur roues, sans avoir à construire de rail. Les serres mobiles existantes sont basées sur de lourdes ossatures métalliques et nécessitent des rails fixés dans des plots de béton. Nous ne voulons pas installer de fondations béton dans le terrain de la ferme de la Bourdaisière. Si un jour ce terrain change d'utilisation, les plots bétons des rails peuvent être un problème important.

Pour s'affranchir des rails sur plots, nous adoptons une solution avec de grandes roues (type roues d'automobile) montées sur une poutre horizontale amovible qui relie les deux pieds d'un arceau. Pour faciliter le roulement, des planches seront disposées au sol. La légèreté de l'ensemble permet de porter moins de 500kg par essieu¹⁶, ce qui permet d'envisager un déplacement manuel sur un terrain présentant des irrégularités.

Le dispositif de mobilité (poutre + roues) sera démontable. Lors des déplacements, la serre sera soulevée à l'aide de roues jockey. La structure sera alors reliée au poutres-essieux portant les grandes roues sur lesquelles s'effectuera le déplacement. Après le déplacement, les

¹⁶ Cf Annexes : *Précisions techniques concernant la serre bioclimatique mobile telle que conçue par Fermes d'Avenir*

dispositifs de mobilité seront retirés et stockés. La serre sera solidement arrimée au sol à l'aide de pieds-vrilles (technologie réversible usuelle d'ancrage des serres).

Effacité thermique

Une double paroi transparente isolante

L'arceau bois-treillis en I facilite également l'amélioration des performances thermiques. Sa hauteur permet de fixer une bâche plastique extérieure (classique) et une bâche plastique intérieure sans qu'elles ne se touchent. Sur les ossatures « fine », la difficulté des doubles parois vient du risque que les deux films puissent se toucher. En effet, en cas de contact, ils se collent à cause de la condensation, il n'y a alors plus de lame d'air et donc plus d'effet isolant. La solution habituelle consiste à maintenir sous pression l'espace entre les deux parois à l'aide de ventilateurs. Dans notre cas, l'ossature de grande épaisseur éloigne les deux films plastiques et permet donc de créer une serre double paroi sans pressurisation.

Pour une efficacité accrue, le film intérieur pourra être de type « papier bulle ». Les serres chauffées sont parfois recouvertes de « papier bulle » par l'extérieur : soumise aux UV et au vent, sa durée de vie est limitée. Dans notre projet le film « papier bulle » aura une durée de vie améliorée du fait de son positionnement intérieur.



Illustration 20: Serres en verre chauffées enveloppées de papier bulle

Inertie mobile

L'inertie thermique ne peut venir que de masses importantes, ce qui paraît contradictoire avec la mobilité. Des réservoirs d'eau/ballastes placés en bordure nord de la serre permettent de résoudre cet apparent paradoxe. Une tonne d'eau par mètre linéaire de serre assurera une bonne inertie. Il suffira d'utiliser cette eau pour l'arrosage dans les jours précédant le déplacement. Les réservoirs seront déplacés à vide. Une fois à leur nouvel emplacement, ils seront de nouveau remplis à l'aide du système d'irrigation.

Hors gel sans chauffage ?

La lame d'air entre les deux parois de plastique ainsi que le papier bulle intérieur ralentiront le refroidissement nocturne. L'inertie des tonnes d'eau permettra de stocker les calories apportées en journée pour les libérer la nuit. Tout cela devrait permettre de conserver la serre hors gel, sans pour autant la chauffer, la plupart des hivers. Agrithermic, fabricant de serres bioclimatiques (métalliques, non mobiles), met en avant de hautes performances : 10° de différence entre l'intérieur et l'extérieur la nuit et hors gel pendant 5 jours à -5°C sans soleil.¹⁷

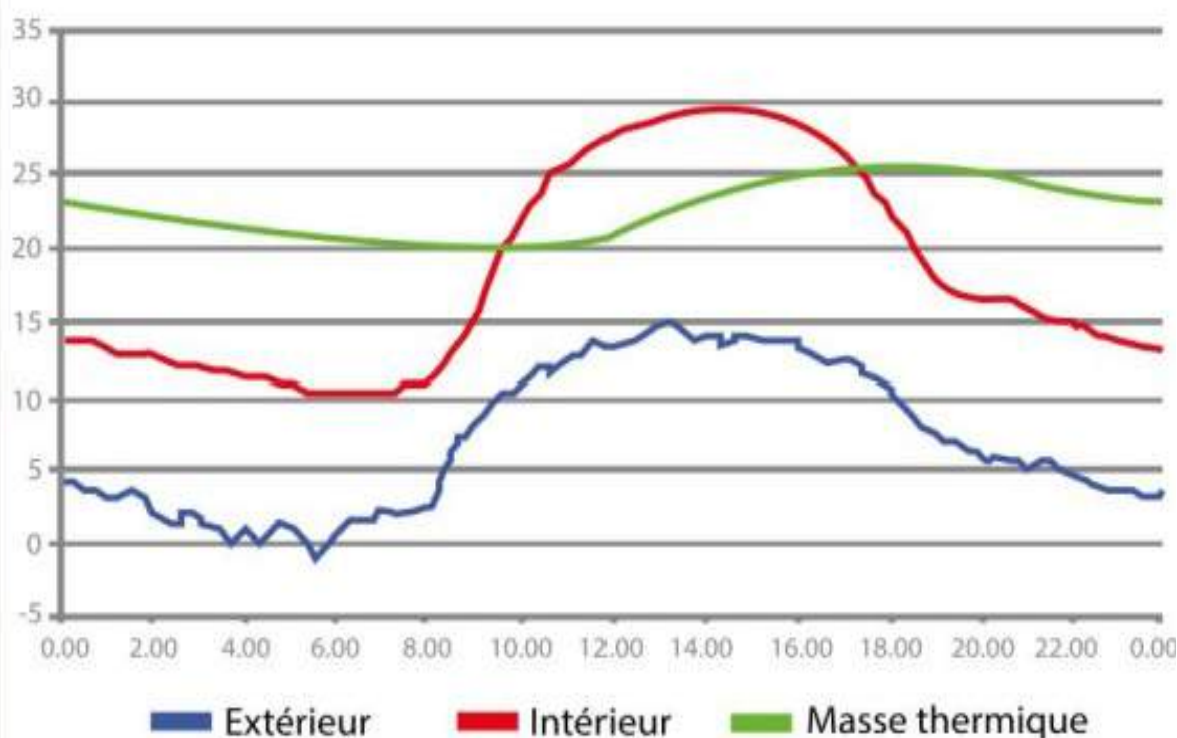


Illustration 21: Fonctionnement thermique d'une serre bioclimatique selon Agrithermic

¹⁷ http://agrithermic.fr/wp-content/uploads/2015/07/Serre_Bioclim_Agrithermic.pdf

Bien entendu, la « performance thermique » d'une serre bioclimatique dépend du climat. Un grand nombre de jours de gel sans soleil ou un grand froid qui dure feront geler une serre bioclimatique. A l'inverse, lors de petites gelées avec des journées ensoleillées, la serre bioclimatique est une réponse très performante. La construction d'une serre et son test en conditions réelles d'utilisation sur la ferme de la Bourdaisière permettront de mesurer le niveau de performance en fonctionnement et d'évaluer son intérêt pour les maraîchers.

Efficacité écologique

Matériau bois

Le choix du bois pour la structure facilite l'auto-construction, permet d'alléger la structure et améliore le bilan écologique (moins d'énergie grise, séquestration de CO₂). Néanmoins, le bilan écologique doit tenir compte de la durée de vie de l'ouvrage. Nous utiliserons des bois et des colles choisis pour leur résistance à l'humidité. En effet, à l'intérieur d'une serre, la condensation sur les parois et l'humidité ambiante soumettront le bois à des conditions difficiles. Du contre plaqué extérieur de conifère pour les « ailettes » et du cœur de Douglas (classe 3) pour les liaisons (âme) vissés et collés avec des colles PPU devraient permettre une bonne durabilité (plusieurs décennies).

Bâches plastiques

Malgré son bilan écologique médiocre, nous retenons la bâche plastique en couverture de la serre. Son faible coût, sa souplesse, sa facilité de pose et sa légèreté en font un matériau sans équivalent pour ce type de structure. De plus, son usage courant sur les serres permet de ne pas multiplier les risques liés à la R&D. Nous utiliserons les techniques et équipements classiques pour tendre et fixer les bâches.

Une serre adaptable à différents contextes

La serre que nous proposons est à la fois mobile et bioclimatique. Néanmoins, selon leur stratégie de culture, les maraîchers pourront utiliser ces plans pour une serre bioclimatique fixe (sans roue), ou pour une serre mobile qui ne soit pas bioclimatique (une seule bâche, pas de stockage d'eau). La structure bois pourrait aussi être utilisée pour des tunnels standards, mais il n'est pas sûr qu'elle soit compétitive pour une serre simple. Le bilan économique en fin de chantier permettra de préciser cela. Le module de 12 m que nous développons pourra être doublé pour constituer une serre de 24m.

On voit que la structure proposée peut être déclinée pour répondre à un large éventail de besoins.

Mobilité latérale

Toutes les serres mobiles recensées se déplacent dans le sens longitudinal. Pour disposer de 4 emplacements pour la serre, il faut donc une longueur de plus de quatre fois la longueur de la serre. Ceci peut être un problème sur certains terrains. Le système de mobilité que nous développons permet d'envisager un déplacement latéral, perpendiculairement à la longueur de la serre. Ceci peut être une option intéressante pour les terrains contraints. Cela nécessitera une adaptation des poutres/essieux et de la géométrie de culture. Aussi, nous ne testerons pas cette configuration dans cette première phase car le déplacement longitudinal est préférable pour la ferme de la Bourdaisière où sera testée cette serre.

Amélioration des conditions de travail du maraîcher

Cette serre d'un nouveau type facilitera le travail du maraîcher grâce à :

- la performance hivernale à coût écologique réduit allongeant la saison de culture
- une mobilité aisée permettant une meilleure utilisation de la serre dans l'année (cf. paragraphe serre-bioclimatique en première partie pour plus de détail)
- un moindre coût investissement car les plans sont mis à disposition gratuitement et l'auto construction est une option

Diffusion en « Open source »

Les plans et une notice constructive basée sur notre expérience seront diffusés en « open-source » via le site de Fermes d'Avenir selon une licence « Creative commons » :



Licence n°6. Attribution + Partage dans les mêmes conditions : Le titulaire des droits autorise toute utilisation de l'œuvre originale (y compris à des fins commerciales) ainsi que la création d'œuvres dérivées, à condition qu'elles soient distribuées sous une licence identique à celle qui régit l'œuvre originale. Cette licence est souvent comparée aux licences « copyleft » des logiciels libres. C'est la licence utilisée par Wikipédia.¹⁸

La libre utilisation permet l'autoconstruction par des maraîchers comme la construction par des menuisiers/charpentiers professionnels au sein d'une relation commerciale.

En autorisant les modifications, on permet à chacun de tester de nouvelles idées qui permettront in-fine l'amélioration du modèle.

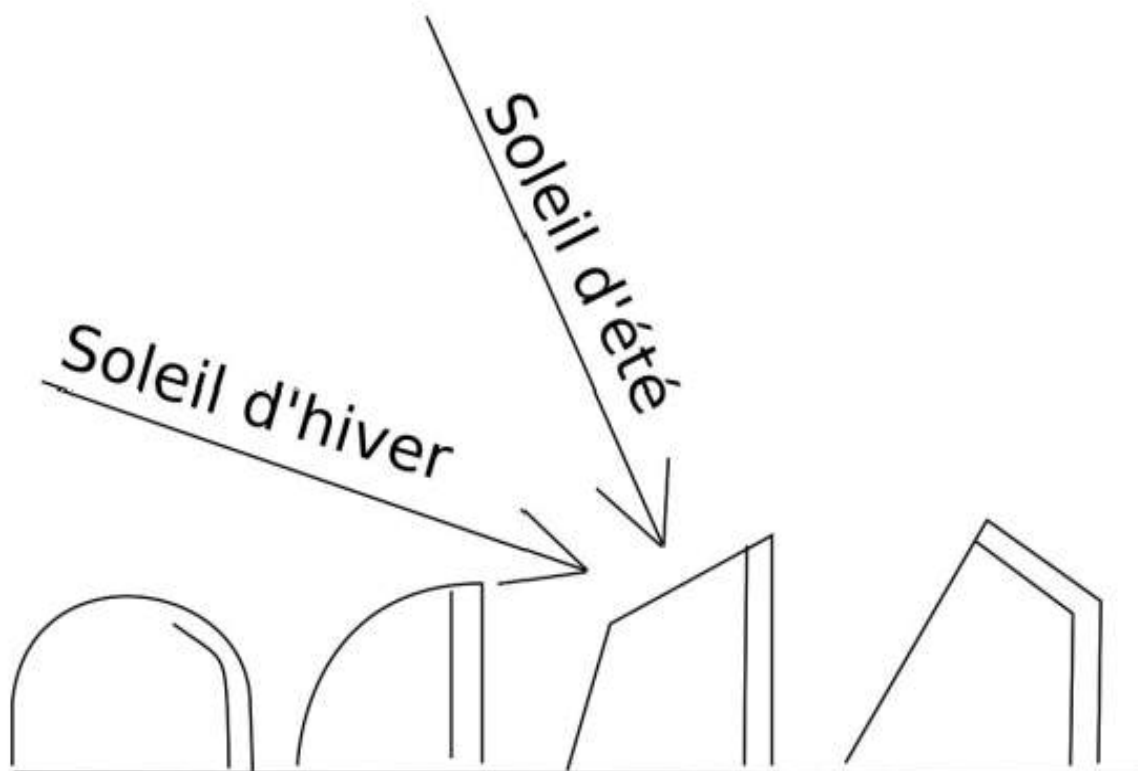
La diffusion « dans les même conditions » assure que le travail de conception ne sera pas « privatisé » et continuera d'être accessible à tous gratuitement.

¹⁸ <http://creativecommons.fr/licences/>

Descriptif technique

La forme

La forme est un des paramètres du bioclimatisme. Elle permet d'optimiser les apports solaires en ayant le plus de surface transparente perpendiculaire au soleil selon la saison. La compacité permet de limiter les déperditions. Plusieurs choix s'ouvrent au concepteur :



Nous avons retenu la forme de gauche, tunnel à pied droit, car elle est classique en maraîchage et peut être utilisée en configuration E/W comme N/S. Sa symétrie facilite le déplacement. L'absence d'angle évite les concentration de contrainte et rend possible la structure d'arceau treillis en I décrit plus haut. Il s'agit d'un compromis permettant d'obtenir un serre adaptable à des contextes variés. Pour une serre purement bioclimatique fixe orientée E/W, le profil de droite serait plus adapté.

L'arceau bois treillis en I

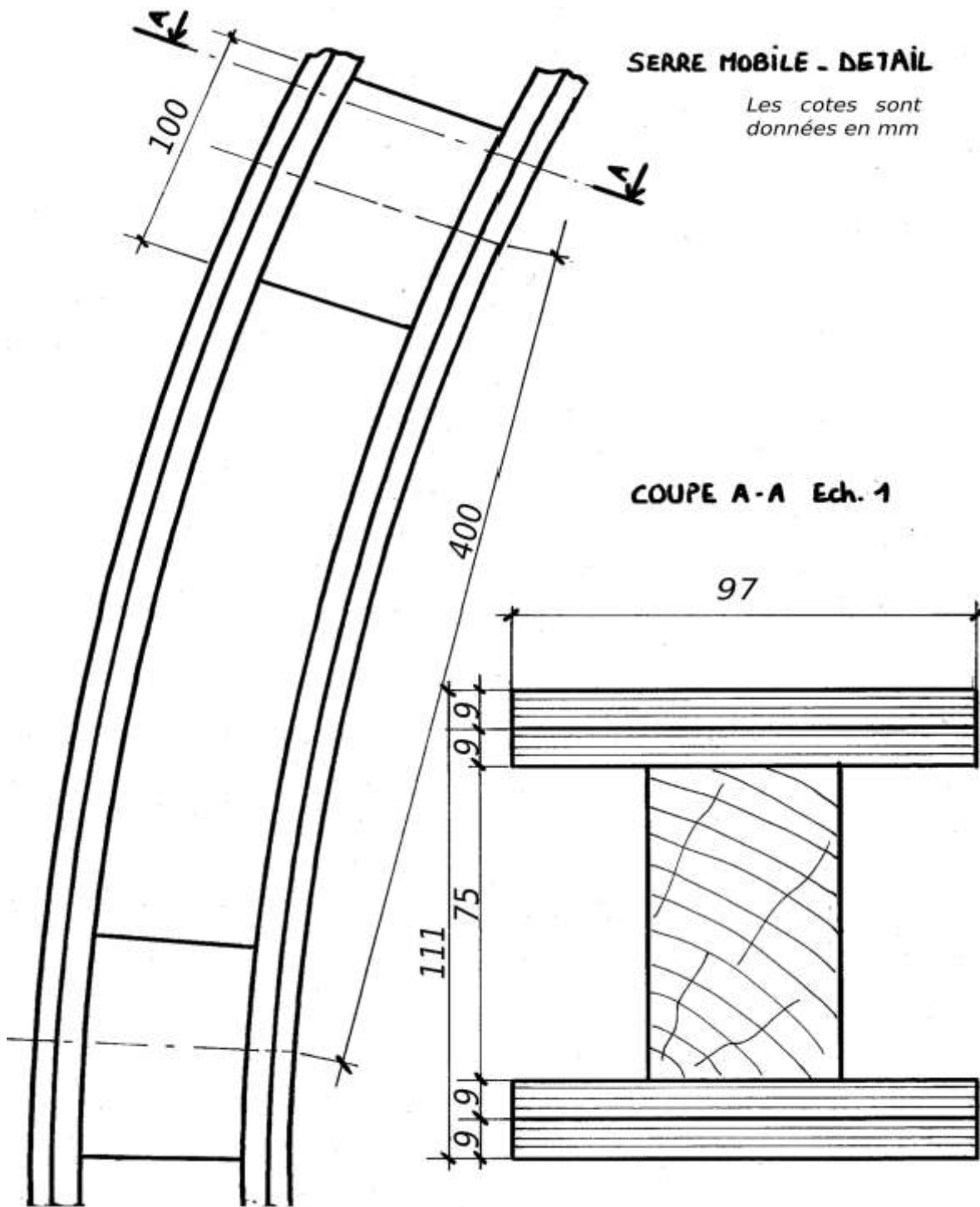
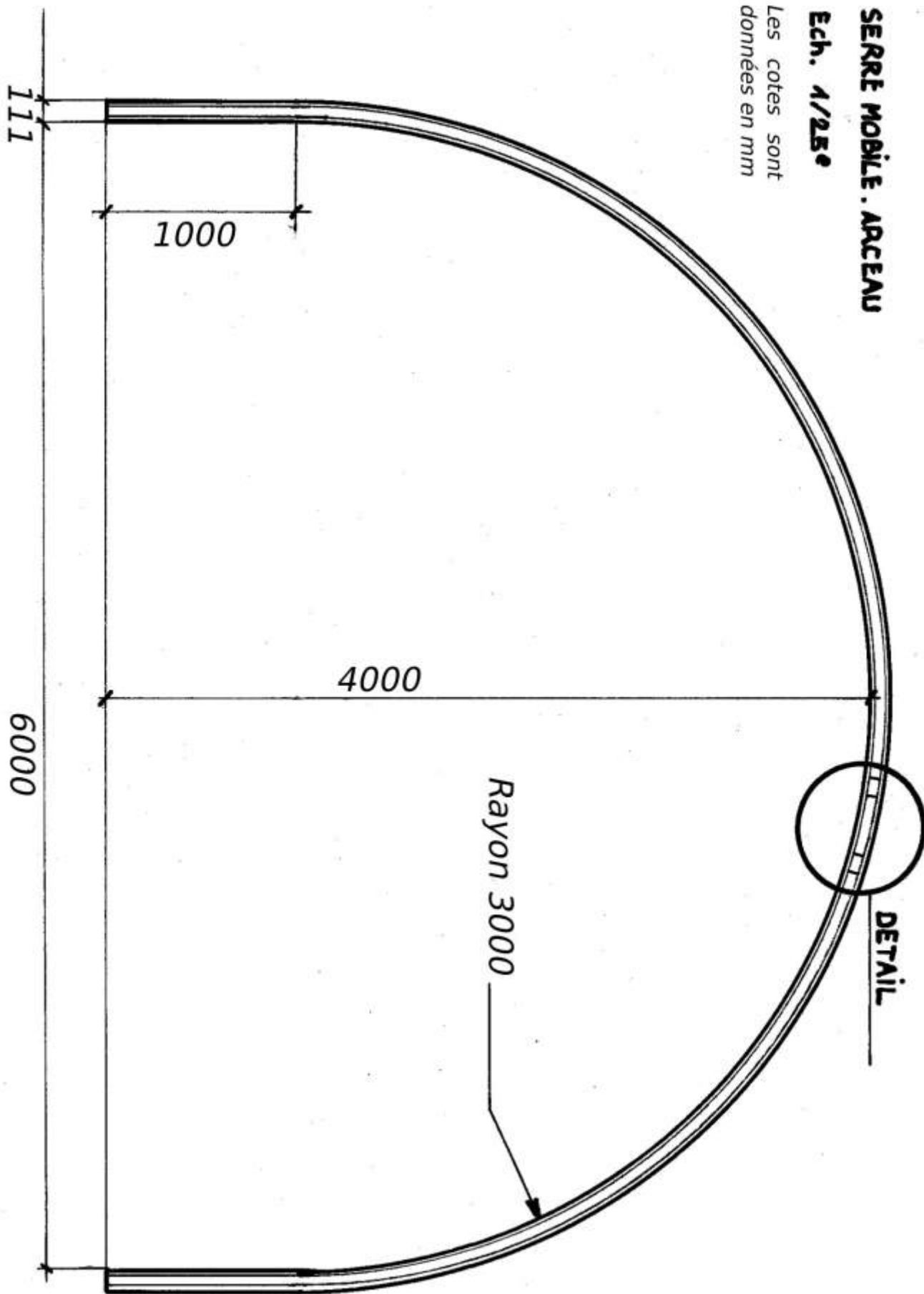


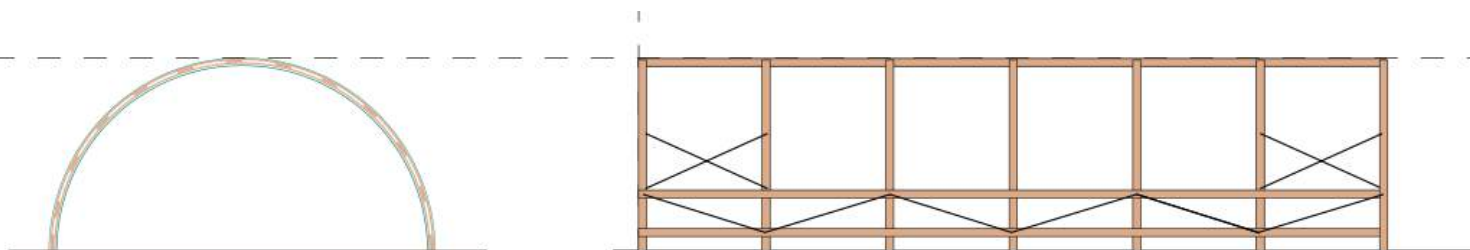
Illustration 22: arceau bois treillis en I, plan de construction, détail



La construction sera réalisée avec l'aide d'un menuisier-charpentier professionnel expérimenté. Ce professionnel est déjà identifié et participe à la conception des structures et des assemblages.

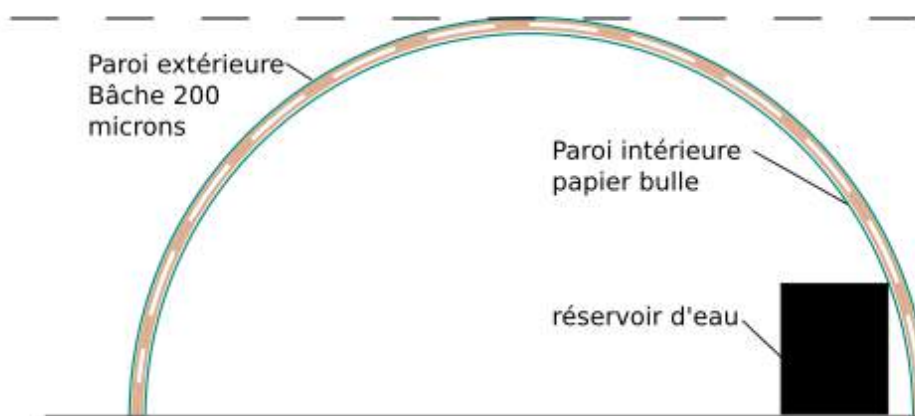
Des arceaux de serre métalliques en tube carré serviront de moule interne pour mettre en forme les pièces de bois. Chaque « ailette du I » sera constituée de deux lattes de contreplaqué extérieur de 9mm pour former des « ailettes » de 18 mm d'épaisseur par 97 mm de large. Les deux ailettes sont reliées par une âme de Douglas de section 75*40 de 100mm de long tous les 400mm.

Structure d'ensemble



Sept arceaux distants de 2m seront assemblés par cinq poutres horizontales. Deux poutres en bas de chaque côté assurent la solidité de l'ensemble lors des déplacements. Une poutre faîtière limite les déformations. Le contreventement est assuré par des croisillons.

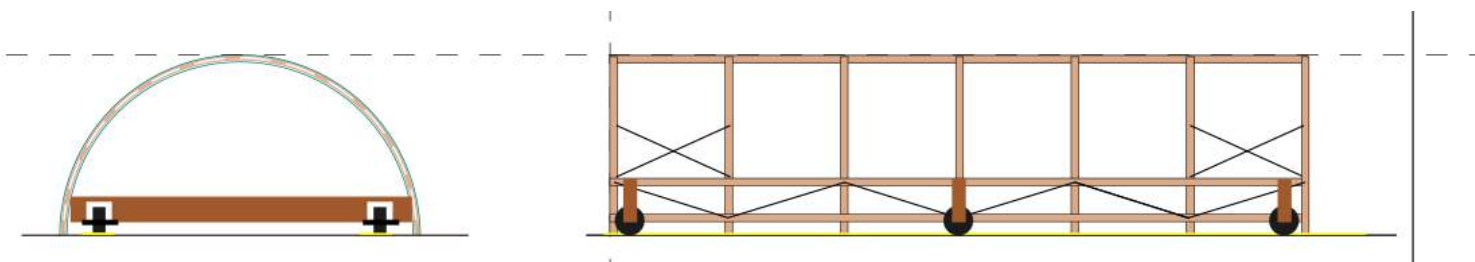
Parois et inertie



La paroi extérieure sera constituée d'une bâche de tunnel classique fixée à l'aide de rails standards. La paroi intérieure constituée de papier bulle sera fixée à l'intérieur des arceaux par un

système de contre-plaques agrafées et des fils nylons longitudinaux. Les réserves d'eau seront constituées de bidons noirs placés en bordure nord de la serre.

Mobilité



La mobilité sera assurée par 3 poutres-essieux amovibles portant de grandes roues (type « roue de voiture ») roulant sur des planches posées au sol pour le déplacement.

Une solution évolutive

Si les tests sur cette première serre s'avèrent concluants, nous envisageons une série d'améliorations possibles ultérieurement pour un second modèle :

- paroi réfléchissante intérieure au nord
- isolation de la paroi Nord entre les arceaux
- rideaux nocturnes
- P17 horizontal sur enrouleur
- ventilateur solaire pour envoyer l'air chaud au faîtage et réchauffer les dispositifs inertiels (eau)
- assemblage de 2 modules de 12 m pour constituer une serre de 24m

Analyse de risque : gestion par prototypes

Le développement de solutions innovantes est, par essence, risqué. Rares sont les dispositifs novateurs qui « fonctionnent du premier coup ». La règle de la R&D est plutôt une série d'essais-erreurs qui permettent les ajustements nécessaires. Dans la construction de l'ouvrage présenté ici, différents risques ont été identifiés :

- dimensionnement et rigidité de l'arceau treillis en I
- étanchéité des pignons
- déformation de la structure lors de la mobilité
- difficulté de roulement
- résistance des matériaux à l'humidité
- et le pire : celui auquel on n'a pas pensé...

La présente conception tient compte de ces risques et les réduit à leur minimum. Néanmoins, seule l'expérience permet certaines confirmations. C'est pourquoi nous allons construire et tester des prototypes pour valider certains points avant construction de la structure finale.

Prototype 1 : arceau

Un arceau sera construit selon les plans présentés plus haut. Il sera soumis à différents tests (déformation, solidité, eau...) avant de valider ou modifier son architecture.

Prototype 2 : une cellule mobile

Deux arceaux seront assemblés par les poutres horizontales et contre-ventés. Les parois intérieures et extérieures seront fixées et les pignons seront fermés. Ceci permettra de tester tous les détails constructifs sur une petite structure et de valider le devis de poids avant réalisation d'une serre complète.

Ces deux prototypes seront construits par l'ingénieur d'étude et le menuisier-charpentier qui réalisera la serre finale. En effet, il est nécessaire de pouvoir modifier la conception durant la phase de prototypage. Une fois toutes les solutions constructives validées, le chantier de construction de la serre de 12m sera mené essentiellement par le menuisier-charpentier.

Annexes

Quelques ouvrages de référence

Construire une serre : Serres solaires passives, conception, exemple de réalisation, Lorentz-Ladener Claudia, Ulmer, 2013.

La conception bioclimatique : Des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation – Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey, Terre Vivante

Quelques fabricants de serres

Pour plus d'information sur la diversité des modèles proposés :

CMF

<http://www.cmf-groupe.com/>

SVL

<http://www.serresvalde Loire.com/>

JRC

<https://www.serres-jrc.com/serres-maraichage/>

RICHEL

<http://www.richel.fr/fr/richel-france/serre-fr/accueil-serre.html>

Agrithermic

<http://agrithermic.fr/fr/serre-bioclimatique/>

Précisions techniques concernant la serre bioclimatique mobile telle que conçue par Fermes d'Avenir

Devis de poids de la structure

Une estimation du poids de la structure a été menée, d'après la géométrie décrite dans le rapport et une hypothèse haute pour la densité du bois (600kg/m³, ce qui est un maximum pour ces types d'essences). La note de calcul est présentée ci-dessous.

Il en ressort que la serre de 6m*12m pèserait dans les environs de 550kg, soit moins qu'une voiture légère. Avec 3 essieux, la charge serait inférieure à 200kg par essieu. Ceci, en comparaison de la manutention de petites remorques de chantier, assure un déplacement aisé (pour mémoire le roulement se fera à l'aide de roues de voitures sur des planches posées au sol). La serre sera donc plus facile à déplacer qu'une voiture. Ces valeurs estimatives doivent néanmoins être considérées avec prudence : seuls les prototypes permettront de valider le devis de poids réel une fois les éventuels aléas de chantier résolus. De plus, il est envisagé à terme le doublement de la structure de 12m pour créer une serre mobile de 24m, une fois les différents objectifs validés avec la serre 12m. Ceci amène à doubler les ordres de grandeurs de poids mentionnés ici, ce qui à priori ne remet pas en cause une mobilité aisée.

Note de calcul

évaluation du poids de la structure d'une serre bioclimatique mobile de 12m de long

longueur arceau

demi cercle : $\pi \cdot R$, R=3m	9,42 m
pièdes droits	1 m
longueur totale	11,42 m

Section moyenne de l'arceau- treillis

2*2 couches de CP de 9 séparées par du chevron de douglas ; largeur tot. 97mm, hauteur tot.:111mm
tasseau de liaison de 10cm de long tous les 40cm (30cm de libre) de 40*75
densité max (Douglas et CP) 600 kg/m³

	section	pour un arceau de 11,5ml		poids	
aillettes hautes 18mm*97mm	1746,00 mm ² /ml	0,01994 m ³		11,96 kg	
Ame : Tasseau 40*75mm sur 1/4 du linéa	3000,00 mm ² /ml	0,00857		5,14	
aillettes hautes 18mm*97mm	1746,00 mm ² /ml	0,01994		11,96	
Total	6492,00 mm ² /ml	0,04844		29,07 kg	soit 2,55 Kg/ml

serre de 6m*12m

7 arceaux	203,46 kg
2 pignons	88,72 kg
2 Bâches 0,2mm : 200g*m ²	55,20 kg
5 transversales de 12m (même poids linéaire que l'arceau)	152,71 kg
quincaillerie	50,00 kg
	550,10 kg

Sur 3 essieux 183,37 kg/essieu

Questions complémentaires :

- roues jockey

Les roues jockey sont des roues montées sur une structure télescopique réglable manuellement par manivelle. Elles sont habituellement fixées à l'avant des remorques et permettent d'en régler

l'assiette lorsqu'elles sont dételées de leur véhicule tracteur. Elles sont donc particulièrement adaptées à soulever des charges manuellement en réglant la hauteur. Elles seront fixées sur les arceaux face aux poutres-essieux amovibles qui portent les roues. Elles permettront de soulever la serre pour la fixer sur les « poutres-essieux » amovibles.

- la double paroi transparente et isolante ne va-t-elle pas générer trop de perte de rayonnement ?

Une double paroi entraîne nécessairement une déperdition d'éclairage, mais la création d'une lame d'air entre les deux parois améliore considérablement l'isolation. A défaut de simulations numériques de ce type de dispositif, on se base sur l'analogie avec le bâtiment bioclimatique où le double vitrage est reconnu comme un optimum en façade sud : il est validé qu'un double vitrage est plus performant qu'un simple vitrage car la perte d'apport solaire est nettement plus que compensée par le gain d'isolation. Par contre un triple vitrage est moins efficace qu'un double car l'amélioration d'isolation (relativement plus faible qu'en passant d'un simple à un double vitrage) ne compense plus la perte d'apport solaire. Deux paroi semble plus performant que une ou trois.

Par ailleurs la pratique de maraîchers expérimenté qui cultivent l'hiver confirme l'utilisation de deux parois : serre + P17 pour Eliot Coleman, tunnel dans un tunnel pour Xavier Mathias, Tunnel horticole double parois du commerce...

Idéalement, la paroi intérieure serait déposée l'été et réinstallée chaque hiver. Le plan proposé permet d'utiliser uniquement l'aspect serre mobile en installant que la paroi extérieure pour ceux qui souhaitent optimiser les performances d'été. Le bioclimatisme d'hiver nécessite un compromis. Le but de ce projet de R&D est justement d'obtenir des retours d'expérience de cette serre utilisée en condition réelle par des maraîchers.

- les contre-plaques agrafées ne vont-elles pas trop alourdir la structure ?

Le contreventement sera assuré par des croisillons, non des contre-plaques.

- les croisillons de contreventement sont-ils en bois ou en métal ?

Les deux hypothèses sont considérées à ce stade, les premiers prototypes permettront de choisir l'option la plus performante.

- poids total = 1500 kg ?

c.f. ci-dessus. Poids total inférieur à 1000kg pour 6m*12m

- Le financement accordé par la Fondation Picard est de 15 000€. Comment prévoyez-vous de financer les 21 000 € restant ?

Le complément sera assuré en auto-financement par Fermes d'Avenir.