

Évaluation de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque directe pour le chauffage et l'éclairage des serres agricoles

par

Nourhene SIALA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, CONCENTRATION ÉNERGIES
RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 7 DECEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Nourhene Siala, 2022



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ricardo Izquierdo, directeur de mémoire
Département de Génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Martin Bourbonnais, codirecteur de mémoire
Centre des Technologies des Énergies renouvelables et du rendement énergétique
Cégep de Jonquière

M. Daniel Rousse, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Danielle Monfet, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 17-11-2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Tout d'abord je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche, Ricardo Izquierdo qui m'a proposé ce projet motivant, Martin Bourbonnais, Titulaire du Centre des Technologies des Énergies renouvelables et du rendement énergétique (TERRE) du CRSNG au Cégep de Jonquière et Patrick Déry, président du Groupe de Recherche de LaBaie et chercheur au centre TERRE pour leur confiance, leurs patiences, leurs disponibilités et surtout leurs judicieux conseils qui ont mené mon travail à bon port.

Je remercie également les membres de jury d'avoir bien voulu participer à l'évaluation de ce travail et l'enrichir avec leurs remarques.

Un grand merci à mes chers parents, mon frère et ma sœur pour leur sacrifice, leur soutien inconditionnel, leur encouragement et leur amour éternel. Merci de m'avoir poussée à réaliser une telle aventure, partir de Tunisie pour vivre au Québec.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mon partenaire de vie : mon fiancé qui a toujours été là pour moi. Merci pour l'écoute, la confiance en moi et le support inconditionnel.

Finalement, je tiens à remercier toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué au succès et l'accomplissement de ce travail.

Conception d'une alimentation photovoltaïque directe pour une serre nordique

Nourhene SIALA

RÉSUMÉ

Le secteur de la serriculture croît à un rythme accéléré pour faire face à l'augmentation de la demande de nourriture et pour faire progresser l'autonomie alimentaire. Plusieurs types de serre ont été développés pour augmenter la production comme la serre verticale et opaque qui assurent une période de culture sur toute l'année avec une quantité de récolte plus élevée grâce aux étages de cultures superposés.

Les producteurs se tournent vers l'utilisation des sources d'énergie renouvelable reconnues par leur faible empreinte environnementale pour moderniser leurs installations, réduire les émissions de gaz à effet de serre et diminuer les coûts de chauffage, d'éclairage et tout autre appareil de gestion du climat. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque a gagné un grand intérêt dans les serres agricoles puisque c'est une source inépuisable et propre avec un coût de panneaux de moins en moins onéreux.

Dans ce mémoire, un modèle qui permet de calculer le besoin en chauffage et éclairage d'une serre transparente et opaque, de dimensionner le système photovoltaïque direct alimentant le système d'éclairage et de chauffage est développé. Le modèle se base sur un ensemble de données d'entrée saisies par l'utilisateur qui sont les données météorologiques horaires, les conditions de culture, les propriétés de la serre, du système photovoltaïque et des lampes d'éclairage. Des simulations ont été lancées en variant les données d'entrées pour comparer le besoin en chauffage et éclairage de plusieurs types de serre, positions géographiques, types de culture et nombre d'étage. Essentiellement, le modèle permet d'évaluer l'intégration du système photovoltaïque sans et avec l'alternance des étages de cultures en analysant le taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque produite et le pourcentage de l'énergie tirée du réseau, de déterminer la photopériode et le nombre de panneaux à installer permettant d'avoir la moindre consommation ou d'avoir un taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque le plus élevé.

Mots-clés : culture en serre, énergie photovoltaïque direct, photopériode, éclairage, chauffage, bilans de chaleur et d'électricité, géométrie solaire, autonomie alimentaire.

Design of a direct photovoltaic power supply for a Nordic greenhouse

Nourhene SIALA

ABSTRACT

The greenhouse sector is growing at an accelerated rate to meet the increased demand for food and to sustain food self-sufficiency. Several types of greenhouses have been developed to increase production such as vertical and opaque greenhouse which ensures a period of cultivation throughout the year with a higher quantity of production thanks vertically stacked layers.

Producers are turning to the use of renewable energy sources recognized for their low environmental footprint to modernize their facilities, reduce greenhouse gas emissions and reduce the costs of heating, lighting, and any other climate management device. Among these renewable energies, photovoltaic energy has gained great interest in agricultural greenhouses since it is an inexhaustible and clean source with a cheap cost of panels.

In this thesis, a model which calculate the energy need for heating and lighting of a transparent and opaque greenhouse, to size the direct photovoltaic system supplying the lighting and heating system is proposed. The model is based on a set of input entered by the user which are the hourly meteorological data, the growing conditions, the properties of the greenhouse, the photovoltaic system and the lighting lamps. Simulations were launched by varying the input data to compare the energy need for heating and lighting of several types of greenhouses, geographical positions, types of crops and number of layers. Basically, the model allows to evaluate the integration of the photovoltaic system without and with the alternation of the layers by analyzing the rate of use of the photovoltaic energy produced and the percentage of the energy drawn from the network, to determine the photoperiod and the number of panels to be installed to have the least consumption or the highest rate of use of photovoltaic energy.

Key words: cultivation under greenhouse, direct photovoltaic energy, photoperiod, lighting, heating, heat flow, solar geometry, food self-sufficiency.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Culture en serre	5
1.1.1 Type de serre : serre verticale et serre traditionnelle	5
1.1.2 Conditions environnementales de culture.....	7
1.1.2.1 Température	7
1.1.2.2 Humidité	8
1.1.2.3 Intensité d'éclairage	8
1.1.2.4 Concentration en CO ₂	9
1.1.3 Système de contrôle du climat	9
1.1.3.1 Système de chauffage	9
1.1.3.2 Système d'éclairage artificiel.....	11
1.1.3.3 Système de refroidissement	12
1.1.4 Flux énergétique dans la serre.....	12
1.2 Énergie photovoltaïque	15
1.2.1 Système photovoltaïque direct.....	16
1.2.2 Intégration de l'énergie photovoltaïque dans les serres agricoles	20
1.2.3 La géométrie solaire et intensité solaire incidente	21
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	25
2.1 Approche de modélisation	25
2.2 Hypothèse et limitation de la modélisation.....	28
2.3 Modélisation du système d'éclairage et chauffage dans une serre transparente et opaque	30
2.3.1 Modélisation de l'éclairage naturel et artificiel dans la serre	30
2.3.2 Modélisation des besoins de la serre en chauffage	32
2.4 Modélisation du système photovoltaïque.....	35
2.4.1 Dimensionnement du système photovoltaïque	35
2.4.2 Calcul de l'intensité solaire sur les surfaces inclinées	36
2.4.3 Calcul de la puissance photovoltaïque produite, utilisé et à stocker.....	40
CHAPITRE 3 COLLECTE DES DONNÉES	42
3.1 Données météorologiques.....	42
3.2 Condition de culture.....	43
3.3 Propriétés des serres.....	45
3.4 Caractéristiques des panneaux photovoltaïques.....	46
3.5 Système d'éclairage artificiel.....	47
3.6 Plan de simulation.....	48
CHAPITRE 4 RÉSULTAT ET DISCUSSION	51

4.1	Différence de besoin en chauffage et éclairage dans la serre opaque et transparente .51
4.2	Comparaison du besoin en chauffage avec la littérature :52
4.3	Différence de besoin en chauffage et éclairage selon la position géographique56
4.4	Impact des types de cultures sur le besoin en chauffage et éclairage59
4.5	L'impact de l'ajout du PV sur la consommation d'énergie du réseau.....62
4.5.1	Impact de l'ajout du système photovoltaïque alimentant le système d'éclairage sur la consommation de l'énergie du réseau 63
4.5.2	Impact de l'ajout du système photovoltaïque alimentant le système de chauffage sur la consommation de l'énergie du réseau 67
4.5.3	Impact de l'ajout du système photovoltaïque alimentant le système d'éclairage et chauffage sur la consommation de l'énergie du réseau..... 71
4.6	Impact du nombre de plateaux de cultures dans le même volume de serre sur le besoin en chauffage et éclairage75
4.7	Impact de l'alternance de l'éclairage entre les étages de cultures sur le besoin en chauffage et éclairage78
4.8	Impact du PV direct pour l'éclairage et chauffage sur la consommation d'énergie du réseau pour serre à 1, 2 et 3 niveaux82
4.9	Optimiser les photopériodes en se basant sur le rendement du système photovoltaïque le plus élevé pour une serre à 1, 2 et 3 niveaux86
4.10	Comparaison des photopériodes optimales.....88
CONCLUSION.....93	
ANNEXE I	Valorisation des surplus de chaleur à l'intérieur de la serre97
BIBLIOGRAPHIE.....101	

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Perte et gain de chaleur dans la serre agricole pris en considération dans plusieurs études15
Tableau 1.2	Évolution de la puissance photovoltaïque installée entre l'année 2010 et 2020 dans divers pays16
Tableau 2.1	Valeur de n par mois37
Tableau 3.1	Exemple de données météorologiques saisies par l'utilisateur sur Excel ..43
Tableau 3.2	Conditions de culture des fraises et des tomates.....44
Tableau 3.3	Caractéristiques structural des deux types de serres46
Tableau 3.4	Caractéristiques thermique des deux types de serres.....46
Tableau 3.5	Caractéristique des panneaux photovoltaïques47
Tableau 3.6	détaillant les variables modifiées, types de serre et les conditions de simulation pour chaque simulation50
Tableau 4.1	Scénarios de photopériode possible dans une serre opaque à un, deux ou trois étages de culture.....75
Tableau 4.2	Scénarios de photopériode possible dans une serre opaque à deux étages de culture.....79
Tableau 4.3	Scénarios de photopériode possible dans une serre opaque à trois étages de culture.....79
Tableau 4.4	Comparaison des photopériodes pour une serre opaque à Jonquière à un étage de culture des fraises89
Tableau 4.5	Comparaison des photopériodes pour une serre opaque à Jonquière à deux étages de culture des fraises90
Tableau 4.6	Comparaison des photopériodes pour une serre opaque à Jonquière à trois étages de culture des fraises.....91

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Exemple d'une serre verticale à plusieurs étages de culture tirée de Eaves (2018, p. 13).....6
Figure 1.2	Flux de chaleur dans une serre agricole.....13
Figure 1.3	Évolution de la puissance photovoltaïque en fonction de la tension de sortie pour plusieurs températures tirée de Rodrigues & Melicio (2011, p. 3).....17
Figure 1.4	Caractéristique I-V d'un panneau Photovoltaïque pour plusieurs irradiances solaires tirée de Rodrigues & Melicio (2011, p. 3).....18
Figure 1.5	Évolution du cout par Watt des modules Photovoltaïque et des onduleurs entre l'année 2010 et 2017 tirée de Allik et al (2019, p. 371)..19
Figure 1.6	Schéma des trois composants du rayonnement incident sur une surface inclinée tirée de Technologies Des Éoliennes (2020, p. 5).....22
Figure 1.7	Schéma des trois composants du rayonnement diffus tiré de M'raoui et al (2011, p. 641).....23
Figure 2.1	Schéma des étapes de modélisation27
Figure 2.2	Résumé des étapes de développement du modèle sur Matlab28
Figure 2.3	Organigramme de calcul de l'énergie photovoltaïque utilisée, à stocker et l'énergie tirée du réseau.....41
Figure 3.1	Principaux fruits et légumes produits en serre au Québec tirée du site du Gouvernement de Québec.....44
Figure 3.2	Structure de la serre transparente et opaque45
Figure 4.1	Besoin en éclairage et chauffage (Serre opaque et transparente à Montréal, culture des tomates).....52
Figure 4.2:	Besoin en chauffage mensuel en MJ/m ² (Serre transparente à Montréal, Culture de Tomates).....53
Figure 4.3:	Variation annuelle des besoins en chauffage d'une serre conventionnelle à Saskatoon dédiée à la culture de tomate, concombre et poivre tiré de M.S.Ahamed (2019, p.86)54

Figure 4.4:	Besoin en chauffage mensuel en MJ/m ² (serre opaque et transparente et opaque à Montréal, culture des tomates)	55
Figure 4.5:	demande mensuelle de chauffage et de refroidissement en MJ dans les serres conventionnelles et fermées de 40 m ² tiré de Banakar (2021, p.5)	56
Figure 4.6	Besoins en éclairage annuel dans plusieurs emplacements (Serre opaque et transparente, culture des tomates)	57
Figure 4.7	Besoin en chauffage annuel dans plusieurs emplacements (Serre opaque et transparente, culture des tomates)	58
Figure 4.8	Besoin d'énergie en chauffage et éclairage annuel dans plusieurs emplacements (Serre opaque et transparente, culture des tomates).....	59
Figure 4.9	Besoin en éclairage annuel (Serre opaque et transparente à Jonquière, culture des fraises et des tomates).....	60
Figure 4.10	Besoin en chauffage annuel (Serre opaque et transparente à Jonquière, culture des fraises et des tomates).....	61
Figure 4.11	Besoin en chauffage et éclairage annuel total (Serre opaque et transparente à Jonquière, culture des fraises et des tomates).....	62
Figure 4.12	Consommation d'éclairage et énergie photovoltaïque produite annuelles par panneaux installés (serre opaque à Jonquière, culture des tomates).....	63
Figure 4.13	Consommation d'éclairage et énergie photovoltaïque produite annuelles par panneaux installés (serre transparente à Jonquière, culture des tomates)	64
Figure 4.14	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre opaque à Jonquière, culture des tomates, éclairage)	65
Figure 4.15	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre transparente à Jonquière, culture des tomates, éclairage)	66
Figure 4.16	Consommation du chauffage et énergie photovoltaïque produite annuelle par panneaux installés (serre opaque à Jonquière, culture des tomates).....	67

Figure 4.17	Consommation du chauffage et énergie photovoltaïque produite annuelle par panneaux installés (serre transparente à Jonquièrre, culture des tomates)68
Figure 4.18	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre opaque à Jonquièrre, culture des tomates, chauffage).....69
Figure 4.19	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre transparente à Jonquièrre, culture des tomates, chauffage).....70
Figure 4.20	Consommation totale et énergie photovoltaïque produite annuelle par panneaux installés (serre opaque à Jonquièrre, culture des tomates).....71
Figure 4.21	Consommation totale et énergie photovoltaïque produite annuelle par panneaux installés (serre transparente à Jonquièrre, culture des tomates).....72
Figure 4.22	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre opaque à Jonquièrre, culture des tomates, chauffage et éclairage)73
Figure 4.23	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre transparente à Jonquièrre, culture des tomates, chauffage et éclairage)74
Figure 4.24	Besoin en éclairage et chauffage annuel par étage de culture (Serre opaque à Jonquièrre, culture des fraises, Scénario S1)77
Figure 4.25	Besoin en éclairage et chauffage annuel par étage de culture (Serre opaque à Jonquièrre, culture des fraises, Scénario S2)77
Figure 4.26	Besoin en éclairage et chauffage annuel par étage de culture (Serre opaque à Jonquièrre, culture des fraises, Scénario S3)78
Figure 4.27	Besoin en éclairage, chauffage annuel par scénario d'éclairage (serre opaque à Jonquièrre, deux niveaux de culture des fraises)80
Figure 4.28	Besoin en chauffage annuel économisé par scénario d'éclairage (Serre opaque à Jonquièrre, deux niveaux de culture des fraises)80
Figure 4.29	Besoin en éclairage et chauffage annuels par scénario d'éclairage (Serre opaque à Jonquièrre, trois niveaux de culture des fraises)81
Figure 4.30	Besoin en éclairage annuel économisé par scénario d'éclairage (Serre opaque à Jonquièrre, trois niveaux de culture des fraises).....82

Figure 4.31	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque (serre opaque à Jonquièrre, un étage de culture des tomates, chauffages et éclairages, Scénario S1).....	83
Figure 4.32	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque (serre opaque à Jonquièrre, deux étages de culture des tomates, chauffage et éclairage, Scénario S2).....	84
Figure 4.33	Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque (serre opaque à Jonquièrre, trois étages de culture des tomates, chauffage et éclairage, Scénario S1).....	85
Figure 4.34	Taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuels par panneaux installés pour plusieurs scénarios d'éclairage (serre opaque à Jonquièrre, un étage de culture des fraises).....	86
Figure 4.35	Taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuels par panneaux installés pour plusieurs scénarios d'éclairage (serre opaque à Jonquièrre, deux étages de culture des fraises).....	87
Figure 4.36	Taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel par panneaux installés pour plusieurs scénarios d'éclairage (serre opaque à Jonquièrre, trois étages de culture des fraises)	88

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CO ₂	Dioxyde de Carbone
PAR	Photosynthetic Active Radiation
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density
PPF	Photosynthetic Photon Flux
PPE	Flux de photons photosynthétique par watt d'énergie électrique
HSP	High-Pressure Sodium
LED	Light Emitting Diode
MPPT	Maximum Power Point Tracker
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
PV	Photovoltaïque
STC	Standard Test Conditions
RT	Réglementation thermique
I-V	Courant-Tension

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

DLI	Intégral de l'éclairage journalier [$\text{mol.jour}^{-1}.\text{m}^{-2}$]
Q_{solaire}	Chaleur produite par les rayonnements solaires [Wh]
$Q_{\text{éclairage}}$	Chaleur produite par l'éclairage artificiel [Wh]
$Q_{\text{conduction}}$	Chaleur perdue ou gagnée par conduction à travers la serre [Wh]
$Q_{\text{conduction_plancher}}$	Chaleur perdue ou gagnée par conduction à travers le plancher [Wh]
$Q_{\text{infiltration}}$	Chaleur perdue ou gagnée par échange d'air extérieur [Wh]
Q	Besoin de chauffage dans la serre [Wh]
$Q_{\text{déperdition}}$	Chaleur perdue dans un bâtiment [Wh]
$C_{\text{déperdition}}$	Coefficient de déperdition volumique [$\text{W.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$]
$V_{\text{bâtiment}}$	Volume du bâtiment à chauffer [m^3]
$P_{\text{éclairage}}$	Puissance consommée par le système d'éclairage [W.m^{-2}]
P_{pvmax}	Puissance d'un panneau photovoltaïque maximale délivrée aux conditions d'opération [W]
$P_{\text{pv_max_STC}}$	Puissance photovoltaïque maximale aux conditions standard [W]
$P_{\text{pvproduite}}$	Puissance photovoltaïque produite [W]
C	Coefficient de température
ΔT	Différence entre la température d'opération et la température aux conditions standards
$P_{\text{pvinstallé}}$	Puissance photovoltaïque installée [W]
$E_{\text{consommation}}$	Énergie consommée par la serre [Wh]
A_i	Surface du plancher de la serre [m^2]
A	Surface totale de toutes les sections de la serre [m^2]
T_{ext}	Température à l'extérieur de la serre [K]
T_{int}	Température à l'intérieur de la serre [K]
$T_{\text{int_bat}}$	Température à l'intérieur du bâtiment [K]
I_i	Intensité solaire horizontale I_i [W.m^{-2}]
T_i	Transmission du matériau de couverture de la serre
F_v	Facteur de vitrage
F_{hc}	Facteur de conversion Thermique

XXII

F_a	Facteur d'allocation de lumière
U_{cond}	Coefficient de transfert thermique [W.K^{-1}]
$U_{\text{cond plancher}}$	Coefficient de transfert thermique du plancher [W.K^{-1}]
A_p	Surface plancher de la serre [m^2]
T_{sol}	Température du sol [$^{\circ}\text{C}$]
ρ_{air}	Masse volumique de l'air [kg.m^{-3}]
C_{air}	Capacité thermique massique de l'air [$\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$]
V_{serre}	Volume de la serre [m^3]
ACH	Nombre d'infiltration d'air [h^{-1}]
U	Coefficient de transfert thermique global [$\text{W}^1.\text{m}^{-2}.\text{C}^{-1}$]
Nb_heures	Nombre d'heures d'ensoleillement par jour
η_{direct}	Rendement du couplage direct d'un système photovoltaïque
N_{pv}	Nombre de panneaux photovoltaïques installés
W	Angle horaire [$^{\circ}$]
T_s	Temps solaire
T_c	Temps standard
E	Équation du temps
λ	Longitude [$^{\circ}$]
Z_c	Fuseau horaire en heures à l'est de GMT
B	Fonction du jour de l'année [$^{\circ}$]
n	Jour de l'année
θ_z	Angle de zénith, angle d'incidence de la radiation directe sur une surface horizontale [$^{\circ}$]
θ	Angle d'incidence de la radiation directe sur une surface, aussi appelé normale solaire [$^{\circ}$]
δ	Déclinaison solaire [$^{\circ}$]
β	Inclinaison du panneau photovoltaïque [$^{\circ}$]
γ	Azimut [$^{\circ}$]
φ	Latitude [$^{\circ}$]
GT_i	L'irradiation solaire globale inclinée [W.m^{-2}]

Gbi	Composante directe de l'irradiation globale inclinée [W.m ⁻²]
Gdi	Composante diffuse de l'irradiation globale inclinée [W.m ⁻²]
Gri	Composante réfléchie de l'irradiation globale inclinée [W.m ⁻²]
GBH	Composante directe de rayonnement solaire horizontale [W.m ⁻²]
GH	L'irradiation solaire globale horizontale [W.m ⁻²]
ρ	Coefficient de réflexion de la lumière diffuse du sol
GDH	Composante diffuse de rayonnement solaire horizontale [W.m ⁻²]
K	Indice de clarté
G0	L'irradiance extraterrestre horizontale [kW.m ⁻²]
G0n	l'irradiation extraterrestre normal [kW.m ⁻²]
Gsc	la constante solaire [kW.m ⁻²]
f_{pv}	Facteur influent la puissance photovoltaïque de sortie
T _{STC}	Température aux conditions standard [°C]
G _{STC}	Ensoleillement aux conditions standard [W.m ⁻²]
GTi	Ensoleillement extérieur horaire sur les panneaux photovoltaïques [W.m ⁻²]

INTRODUCTION

Alors que l'agriculture au Québec est largement influencée par le climat froid et la demande de nourriture ne cesse d'augmenter avec la croissance de la population, la culture en serre est considérée comme l'alternative pour faire cheminer, même partiellement, l'autonomie alimentaire. La serriculture permet de faire pousser des légumes et des fruits jusqu'à 12 mois par année, mais en contrepartie elle nécessite un environnement bien contrôlé (Humidité, température, intensité d'éclairage, concentration en CO₂) ce qui engendre une consommation d'énergie élevée particulièrement en période hivernale. Les couts liés à cette consommation sont devenus des limites majeures de la compétitivité des serres. En effet, les couts de chauffage et de climatisation d'une serre représentent entre 70 % et 85 % des couts de production (Ahamed, Guo, & Tanino, 2019).

À part les serres conventionnelles, plusieurs autres types de serres ont été construites comme les serres enterrées, isolées, opaques, intégrées aux bâtiments. Quel que soit le type, des conditions de cultures intérieures doivent être maintenues à l'aide des systèmes de chauffage, ventilation, éclairage ainsi que leur contrôle et commande.

Dans le but de s'éloigner de l'utilisation des énergies fossiles, d'avoir des récoltes plus locales et de diminuer les couts de production, l'énergie photovoltaïque a démontré un grand potentiel d'intégration dans les serres agricoles (Zhang et al., 2022). En effet, la technologie photovoltaïque ne se présente pas seulement comme une technologie écologique et durable, mais aussi une technologie avec une efficacité importante de conversion de l'énergie solaire en une énergie électrique. Bien que le prix des panneaux photovoltaïques ait diminué d'environ 80 % depuis 2010 (Fu et al., 2017), le cout de l'étage de conversion électronique reste stable et entraîne un cout total élevé ainsi qu'une complexité et entretien supplémentaire. Un système photovoltaïque à couplage direct, dans lequel la charge est directement connectée, est plus simple et moins couteux ce qui en fait un système des plus compétitif. Peu étudié, l'utilisation directe du solaire PV direct concerne plusieurs champs d'applications prometteurs comme le chauffage et le pompage de l'eau, l'alimentation

d'équipements électriques, la soudure parmi la vingtaine identifiée par une revue de littérature du Centre TERRE (Déry et al., 2021) .

Dans ce contexte, le but de cette étude est la conception et comparaison des performances d'une serre transparente et opaque alimentée par l'énergie photovoltaïque directe sous différentes conditions de climat et de culture. Le modèle permet de :

- Évaluer l'utilité d'intégration du système photovoltaïque pour chauffer et éclairer une serre transparente et opaque et optimiser le nombre de panneaux permettant l'utilisation maximale de l'énergie photovoltaïque produite.
- Déterminer la photopériode assurant la moindre consommation d'éclairage et chauffage et l'utilisation maximale de l'énergie photovoltaïque tout en tenant compte de la possibilité de l'alternance entre les étages de la serre.
- Comparer la consommation d'énergie annuelle et horaire du système de chauffage et d'éclairage dans les deux serres pour différentes conditions variables choisies par l'utilisateur comme la position géographique, le type de culture, le nombre d'étages de culture, etc.

Étant donné que les serres agricoles en climat froid ont besoin d'une quantité d'énergie très importante pour assurer le chauffage, dans le présent travail le système photovoltaïque s'intéresse à alimenter le système de chauffage et éclairage uniquement. Le besoin en refroidissement de la serre n'est pas pris en compte.

Le présent mémoire est composé de 4 chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur l'agriculture en serre, les conditions de cultures, les systèmes de chauffage et d'éclairage, les échanges thermiques dans les serres, l'énergie photovoltaïque directe, l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans les serres, les modèles de calculs de l'intensité solaire sur les surfaces inclinées.

Le second chapitre présente l'approche, les hypothèses et les limites de modélisation, le modèle mathématique qui permet de calculer la consommation de chauffage et éclairage et le dimensionnement du système photovoltaïque pour les deux types de serres.

Le troisième chapitre présente les données d'entrée, les conditions et contraintes de simulation.

Le quatrième chapitre présente les résultats de simulations, leurs analyses et la discussion.

Finalement, le mémoire est clôturé par une conclusion et des perspectives.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présente la revue de littérature en rapport avec le présent sujet de recherche. La première partie est consacrée à présenter les différents types de serres, les conditions environnementales de culture, les systèmes de contrôle du climat et les flux de chaleur à l'intérieur de la serre. La deuxième partie met l'accent sur l'énergie photovoltaïque : son intégration dans les serres agricole, le couplage direct des systèmes photovoltaïque et la géométrie solaire.

1.1 Culture en serre

La production des champs du Québec approvisionnait seulement une partie du marché des légumes frais consommés, le reste provient de la production des serres du Québec, de l'importation internationale (principalement du Mexique) et interprovinciale principalement de l'Ontario. Pour contribuer à l'autosuffisance alimentaire, au développement de l'économie québécoise et la disponibilité d'aliments sains, le Québec a lancé le projet de développement de la production serricole. En effet, la production serricole est répartie sur tout le territoire du Québec dans 468 entreprises de toutes tailles qui totalisent 123 hectares en 2018 et qui ont généré des recettes monétaires de 160 millions de dollars en 2020.

1.1.1 Type de serre : serre verticale et serre traditionnelle

La serre traditionnelle est une construction de verre ou plastique qui consiste à faire pousser des plantes hors saison à l'aide de l'énergie solaire, des systèmes d'irrigation, de chauffage, de ventilation et d'éclairage artificiel. Elle protège les plantes des éléments externes comme le froid et l'intempérie. La serre peut prendre plusieurs formes et orientations qui lui permettent de maximiser la transmission des rayons solaires spécifiquement pendant l'hiver.

La serre verticale est connue aussi sous le nom de ferme verticale. C'est un système de culture fermé qui permet d'obtenir une production constante sur toute l'année. Les cultures ne dépendent pas de la surface du sol et ils poussent sur plusieurs étages. Cet espace d'agriculture offre un environnement hautement contrôlé et étanche et utilisent 100 % un éclairage artificiel.

La serre verticale possède plusieurs avantages par rapport à la serre traditionnelle. Elle peut être installée à divers endroits clos (industrie, toit, sous-sol, etc.) ce qui réduit le transport et facilite la distribution des récoltes dans l'environnement urbain de proximité. Au contraire, la serre traditionnelle dépend de la disponibilité des terrains et utilise une grande quantité d'énergie fossile pour transporter les récoltes du site de production aux consommateurs (Son et al., 2020). De point de vue productivité, la serre verticale est plus avantageuse puisqu'elle permet de produire une quantité plus élevée par surface au sol grâce à l'utilisation de plusieurs étages (Kozai, 2013). La figure 1.1 montre un exemple d'une serre verticale à plusieurs étages.



Figure 1.1 Exemple d'une serre verticale à plusieurs étages de culture
tirée de Eaves (2018, p. 13)

Dans le cas d'une ferme verticale, l'environnement de culture est contrôlé de manière optimale et n'est pas affecté ni par la fertilité du sol ni par le climat extérieur à l'aide de

l'isolation élevée. En revanche, dans la serre traditionnelle, les conditions environnementales sont difficiles à optimiser (Température, humidité, éclairage), car ils dépendent fortement de l'intensité solaire variable.

Les inconvénients évidents de la ferme verticale sont les couts de construction et de production élevés et la forte demande d'énergie par l'éclairage artificiel et le système de refroidissement et de chauffage. Cependant, la serre traditionnelle utilise principalement l'énergie solaire gratuite pour satisfaire le besoin d'éclairage et chauffage (Graamans et al., 2018).

1.1.2 Conditions environnementales de culture

Le succès de la production en serre repose sur une gestion du climat efficace notamment de la température, du taux d'humidité, de l'intensité lumineuse et du taux de dioxyde de carbone (CO₂).

1.1.2.1 Température

La température est un paramètre de base de la conduite climatique des serres, car elle influence le processus de photosynthèse, de respiration et de développement des plantes. La température ambiante requise dans la serre varie selon le type de plante et selon la phase horaire. En effet, la température en photopériode est différente de la température en période obscure et elles agissent différemment sur la plante. La première agit principalement sur l'élongation des cellules et la photosynthèse tandis que la deuxième agit principalement sur la respiration et la nouaison. L'écart entre la température de jour et la température de nuit permet de limiter les pertes par respiration, d'assurer l'équilibre génératif/végétatif et d'avoir une morphologie de plantes compacte (Turcotte et al., 2015).

1.1.2.2 Humidité

L'humidité relative à l'intérieur de l'espace cultivé représente la proportion de saturation de l'air en vapeur d'eau et elle nécessite un contrôle adapté aux plantes cultivées. Les serres doivent fournir un environnement contenant suffisamment d'humidité pour la production végétale, car un excès ou un manque d'humidité influence fortement les plantes. En effet, une humidité élevée entraîne l'augmentation des maladies des feuilles et des fleurs (Joun Worley, 2014). Tandis qu'une humidité faible freine la croissance des cultures en arrêtant la photosynthèse et par la suite fait flétrir les plantes (Fahmy et al., 2012). Ce facteur peut être contrôlé par plusieurs méthodes selon la saison comme la condensation, la ventilation et le chauffage (Turcotte et al., 2015).

1.1.2.3 Intensité d'éclairage

L'intensité d'éclairage est considérée comme le facteur le plus limitant dans la croissance et le développement des plantes puisqu'elle est la force motrice de la photosynthèse. La photosynthèse est la conversion du dioxyde de carbone et de l'eau en glucides à l'aide de l'énergie lumineuse (Engineering, 1994).

Dans un espace d'agriculture, l'intensité lumineuse est assurée par l'énergie solaire et/ou l'éclairage artificiel et elle est spécifique au type de plante cultivée (National & Pillars, n.d.). Les longueurs d'onde utiles pour la photosynthèse des plantes s'étendent sur le spectre visible entre 400 nm et 700 nm. La quantité de lumière dont les plantes ont besoin peut être exprimée en $\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$. Cette quantité de lumière nommée DLI est définie comme la lumière quotidienne intégrale. Elle représente le nombre de photons qui atteignent la plante pendant la photopériode quotidienne. Une autre notation est également utilisée PPFD : densité de flux de photons synthétique et exprimé en $\mu\text{mol}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Benis et al., 2017).

1.1.2.4 Concentration en CO₂

Le dioxyde de carbone est essentiel pour la photosynthèse et par la suite à la croissance des plantes (Carbon Dioxide in Greenhouses, n.d.). Des études ont montré qu'une concentration en CO₂ trois fois plus élevée que celle contenue dans l'atmosphère normale (0.035 % environ 350 ppm) est bénéfique pour la croissance de la plupart des plantes. Le niveau optimal de concentration en CO₂ varie d'une culture à une autre et dépend fortement de l'intensité lumineuse, de la température et du stade de maturité de la culture (Li et al., 2018).

1.1.3 Système de contrôle du climat

Les conditions environnementales de culture favorisant la productivité agricole sont maintenues à l'aide de plusieurs systèmes comme le système de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel.

1.1.3.1 Système de chauffage

Les couts de chauffage dans les serres agricoles en milieu froid sont élevés ce qui rend primordial le choix du système de chauffage approprié. Il existe deux types de systèmes de chauffage. Les systèmes de chauffage actifs qui utilisent d'autres sources pour apporter la chaleur et augmenter la température. Les systèmes de chauffage passifs utilisent quant à eux, l'énergie solaire pour chauffer la serre en stockant la chaleur dans des matériaux appropriés (Ahamed, Guo, & Tanino, 2019).

La chaleur des systèmes de chauffage actif est à air chaud, eau chaude ou à rayonnement infrarouge. Si les canaux de conduite de l'air chaud sont entre les rangées de plantes alors l'efficacité du système de chauffage à air chaud est la même que celle à eau chaude où les tuyaux sont proches des plantes. Le chauffage à rayonnement infrarouge possède un rendement plus élevé, car il n'y a pas de déplacement d'air ce qui limite les pertes par convection. Cependant ce système a des conséquences négatives sur le développement des plantes (Ahamed, Guo, & Tanino, 2019).

Dans les serres agricoles, les systèmes de chauffage actifs fonctionnent avec des pompes à chaleur (Min et al., 2014), des chaudières, ou des pompes à chaleur combinés avec des collecteurs solaires pour diminuer la consommation d'énergie fossile (Ozgener & Hepbasli, 2005). En Colombie-Britannique, le nombre de chaudières à bois a augmenté (Ahamed, Guo, & Tanino, 2019). Une méthode d'analyse de cout de chauffage dans une serre de légumes commerciaux en Colombie-Britannique a montré qu'un système de chauffage bi énergie composé de 40 % de biomasse et de 60 % de gaz naturel est plus économique qu'un système de chauffage composé à 100 % de gaz naturel (Chau et al., 2009).

Les systèmes de chauffage passifs utilisent directement l'énergie solaire ce qui permet de réduire les couts de chauffage dans les serres. La chaleur de l'énergie solaire est stockée dans les serres sous forme de chaleur sensible, latente et thermochimique.

Les systèmes de chauffage passifs les plus utilisés dans les serres sont :

- Le mur nord massif : cette technique consiste à utiliser une masse thermique dans le mur nord qui peut stocker l'énergie solaire provenant d'est en ouest pendant la journée et la libérer pendant la nuit. Cette masse thermique est généralement en briques ou bloc de ciment remplie de différents matériaux à haute capacité de stockage de chaleur comme le sable et le béton (M. S. Ahamed, Guo, & Tanino, 2019). Une étude sur une serre contenant un mur nord construit en briques recouvertes de béton en Iran a montré que 13.4 % de la consommation d'énergie est réduite (Ghasemi Mobtaker et al., 2016).
- Le lit rocheux : C'est une technique simple et économique, qui permet de stocker la chaleur pendant la journée dans les roches et la restituer la nuit ce qui aidera à chauffer la serre la nuit et la rafraichir la journée. Elle est capable d'augmenter la température d'air la nuit de 3°C et d'améliorer le rendement de production de 22 % (Gourdo et al., 2019).

- Les réservoirs d'eau : l'eau est utilisée comme support de stockage. Elle est remplie dans des sacs en plastique ou des tubes et ils sont placés sur la terre de la serre. Dans ce cas l'eau agit comme capteur solaire et peut maintenir une température intérieure plus élevée de 2°C à 10°C, tout dépend du volume de l'eau et la taille de la serre (M. S. Ahamed, Guo, & Tanino, 2019).

1.1.3.2 Système d'éclairage artificiel

La croissance des plantes est inséparable de la lumière. Par la suite, il faut contrôler l'énergie naturelle et ajouter l'éclairage artificiel pour avoir suffisamment d'énergie lumineuse dans la serre.

L'éclairage artificiel à ajouter dépend de la lumière naturelle quotidienne dans la serre qui varie en fonction de l'emplacement, de la période de l'année, de l'orientation et des matériaux de couverture de la serre. L'éclairage avec des lampes HSP (sodium haute pression) est très répandu dans les serres tandis que la technologie des lampes LED (diode électroluminescente) s'implante graduellement (ÉCLAIRAGE DE PHOTOSYNTHÈSE, 2018).

Les lampes LED émettent des longueurs d'onde plus susceptibles d'activer la photosynthèse, permettent d'économiser de 10 % à 20 % de la consommation d'énergie par rapport aux lampes HSP et ont une durée de vie supérieure. Cependant, elles ont un cout élevé et émettent moins de chaleur ce qui compense moins le besoin en chauffage de la serre (Katzin et al., 2021).

Dans les fermes verticales, l'éclairage à l'aide des lampes LED est avantageux puisqu'il permet de placer les lampes proches des plantes sans les bruler grâce aux pertes thermiques radiatives négligeables (Ahn et al., 2020).

1.1.3.3 Système de refroidissement

Plusieurs techniques sont utilisées dans les serres agricoles pour refroidir l'air à l'intérieur. Parmi ces techniques, il y a les systèmes d'ombrages, ils contrôlent l'entrée de rayonnement en faisant entrer seulement une quantité de lumière optimale et nécessaire pour la croissance des plantes, ce qui permet de réduire la charge de refroidissement. Une conception d'une serre munie des lentilles de Fresnel sur son toit couvert qui dispersent la lumière du soleil sur les plantes a permis de diminuer le surplus de chaleur de 80 % par mois (Pakari & Ghani, 2019).

La ventilation aussi empêche les températures de monter trop haut et elle est très utilisée dans les serres. Certaines serres utilisent la ventilation naturelle, principalement décrites comme un échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur. Elle nécessite moins d'énergie, d'équipement et représente la méthode la moins chère pour refroidir une serre (Joun Worley, 2014). Un nombre d'échange d'air entre 0.75 et 1 par heure permet d'éliminer l'excès de chaleur dans la serre.

D'autres serres utilisent la ventilation forcée qui assure une circulation d'air à l'aide des ventilateurs. La méthode la plus courante de ventilation forcée est l'installation des ventilateurs sur le mur d'extrémité qui aspirent l'air entré dans la serre (Joun Worley, 2014). Une autre technologie de ventilation forcée combine avec les ventilateurs des coussins humides, l'air entré est alors refroidi par évaporation ce qui fait diminuer sa température et par le fait même, la température dans l'enceinte intérieure (Kumar et al., 2009).

1.1.4 Flux énergétique dans la serre

L'étude des flux énergétiques dans la serre est nécessaire afin de quantifier la consommation des systèmes de contrôle du climat intérieur, spécialement le système de chauffage et de refroidissement.

Les différents flux de chaleur étudiés dans la littérature sont présentés dans la figure 1.2 :

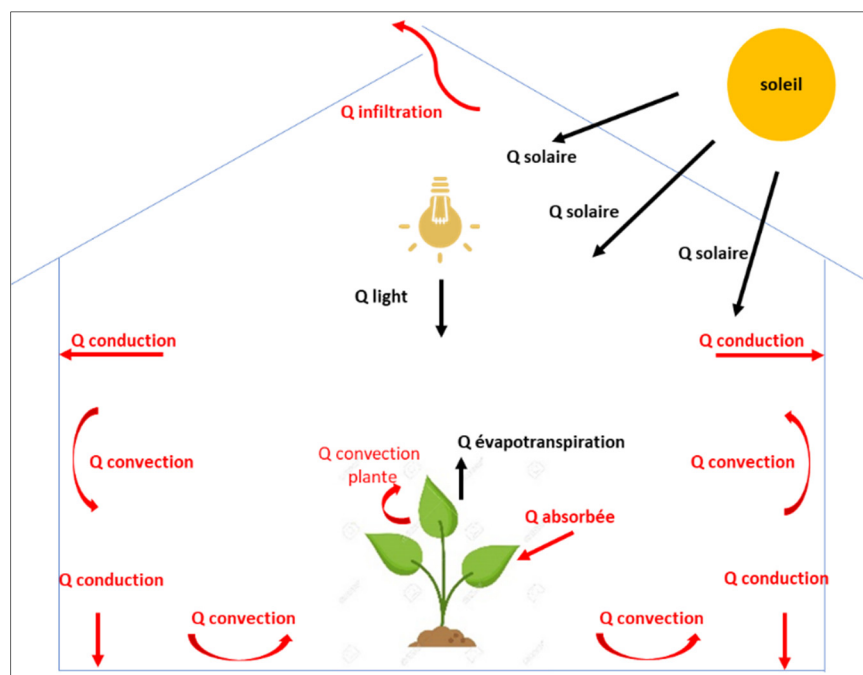


Figure 1.2 Flux de chaleur dans une serre agricole

- Q_{solaire} : c'est le gain solaire du rayonnement solaire qui traverse la couverture de la serre et qui est absorbé par les composants intérieurs de la serre. Le rayonnement solaire absorbé dépend de la transmission et l'orientation de la serre. Cet apport est nul dans les fermes verticales (Ahamed et al., 2018).
- Q_{light} : C'est le gain de chaleur par lumière artificielle. Selon le type des lampes, l'éclairage artificiel peut restituer environ 75 % à 100 % de l'énergie thermique sous forme de chaleur (Ahamed et al., 2018). Par exemple les lampes LED produisent une quantité de chaleur faible par rapport la chaleur produite par les lampes HSP (ÉCLAIRAGE DE PHOTOSYNTÈSE, 2018).
- $Q_{\text{conduction}}$: correspond aux pertes de chaleur par conduction pour toutes les sections de la serre (mur, toit, plancher et périmètre). Ces pertes dépendent fortement des matériaux de recouvrement de la serre et se produisent lorsque la chaleur est transférée entre deux corps en contact direct (Pelletier & Sc, 2017).

- **Q convection** : les pertes de chaleur par convection se produisent lorsque la chaleur est transférée au moyen de l'air ambiant vers la surface de la serre ou tout objet dans la serre comme les plantes. La conduction et la convection sont deux des principaux phénomènes de transfert de chaleur dans les serres.
- **Q infiltration** : l'échange d'air avec l'extérieur transfère une grande quantité de chaleur vers l'extérieur pendant l'hiver. En fonction de la vitesse du vent et des écarts de température intérieur-extérieur, l'infiltration représente jusqu'à 20 % de la perte totale de chaleur des serres. L'échange d'air est réalisé généralement dans les serres lorsque la température intérieure est supérieure à la température de consigne (Jolliet et al., 1991).
- **Q évapotranspiration** : L'évapotranspiration représente la perte d'eau vers l'air par le sol (évaporation) et la plante (transpiration) et elle est responsable d'une diffusion de chaleur importante dans la serre. L'évapotranspiration est plus élevée dans le cas d'une culture en plein soleil que dans le cas de culture sous serre (G. N. Tiwari, n.d.).
- **Q absorbé** : Corresponds à la chaleur du rayonnement d'éclairage (naturel et/ou artificiel) absorbé par la plante. La fraction du rayonnement absorbé dépend généralement de la quantité de feuilles, de leur orientation et de leur répartition (S. Ahamed et al., 2018).
- **Q convection plante** : Ce sont les pertes de chaleur dues à l'énergie convective échangée entre les feuilles des plantes et l'air ambiant de la serre.

Le tableau 1-1 englobe les flux de chaleur pris en considération dans plusieurs études qui modélisent les échanges thermiques à l'intérieur des serres. Les gains de chaleur par radiation solaire et les gains ou pertes de chaleur par conduction et convection sont généralement intégrés dans toutes les études. D'après ce tableau, les différents gains et pertes de chaleur ne

sont pas toujours pris en compte dans une étude et par la suite des hypothèses simplificatrices peuvent être utilisés.

Tableau 1.1 Perte et gain de chaleur dans la serre agricole pris en considération dans plusieurs études

Perte/gain	Études						
Pertes ou gain de chaleur par	(Graa mans et al., 2017)	(Kiya n et al., 2013)	(Gupta & Chand ra, 2002)	(Esmae li & Roshan del, 2020)	(Choab et al., 2021)	(S. Ahame d et al., 2018)	(Talbot & Monfet , 2018)
Radiation solaire	X	X	X	X	X	X	
Lumière artificielle	X					X	X
Évapotranspiration des plantes	X			X	X	X	X
Équipements Mécaniques						X	
Ventilation naturelle		X	X		X	X	X
Ventilation forcée				X	X		X
Absorption des plantes	X			X			X
Conduction	X	X	X	X		X	X
Convection	X	X	X	X	X	X	X

1.2 Énergie photovoltaïque

L'emploi de l'énergie fossile pour répondre à l'augmentation de la demande mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter la quantité de CO₂ émis et d'épuiser les ressources naturelles. Pour cela, les gouvernements et les décideurs énergétiques, particulièrement dans le monde entier, s'efforcent d'être moins dépendants des sources d'énergie fossile en exploitant d'autres sources d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, la biomasse...(Jamil et al., 2017).

L'utilisation d'énergie solaire et particulièrement l'utilisation des systèmes photovoltaïque a gagné un intérêt mondial au cours des dernières années grâce à leur durabilité, leur performance améliorée, la réduction de leur coût de fabrication et leur impact écologique plus faible que les combustibles fossiles (K. Zhang et al., 2022).

Le tableau 1.2 tiré et traduit de l'article (BP Energy outlook, 2021), représente l'évolution de la puissance photovoltaïque installée de l'année 2010 jusqu'à 2020 dans plusieurs pays et dans le monde entier.

Tableau 1.2 Évolution de la puissance photovoltaïque installée entre l'année 2010 et 2020 dans divers pays

Année	Amérique du nord (GW)	Europe (GW)	Chine (GW)	Le Monde (GW)
2010	2.3	30.1	1	40.1
2015	24.4	97.5	53.4	217.5
2020	82.8	176.8	253.8	707.5

L'énergie photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque qui a été découvert en 1839. C'est un processus physique par lequel une cellule photovoltaïque convertit la lumière du soleil en électricité.

Une cellule photovoltaïque est composée d'une couche semi-conductrice à surplus d'électrons, qui est exposée à la lumière du soleil et d'une couche semi-conductrice à déficit d'électron. Une fois que la lumière du soleil atteint les panneaux solaires, les photons absorbés fournissent l'énergie nécessaire pour libérer certains électrons et ces électrons circulent de la couche négative vers la couche positive pour produire l'électricité (Sampaio & González, 2017).

1.2.1 Système photovoltaïque direct

La performance du module photovoltaïque est généralement évaluée dans des conditions standard : radiation égale à 1000W.m^{-1} , masse solaire AM1.5 et température égale à 25°C

lorsque les modules photovoltaïques sont exposés dans des conditions réelles, les conditions standard sont rarement rencontrées. Par la suite, la puissance générée par ces modules est influencée par plusieurs facteurs environnementaux tels que le rayonnement solaire et la température. La figure 1.3 représente l'évolution de la puissance photovoltaïque délivrée avec le changement de la température. Si la température de la cellule photovoltaïque augmente, la puissance produite par la cellule diminue et par la suite l'efficacité de conversion du rayonnement en électricité diminue.

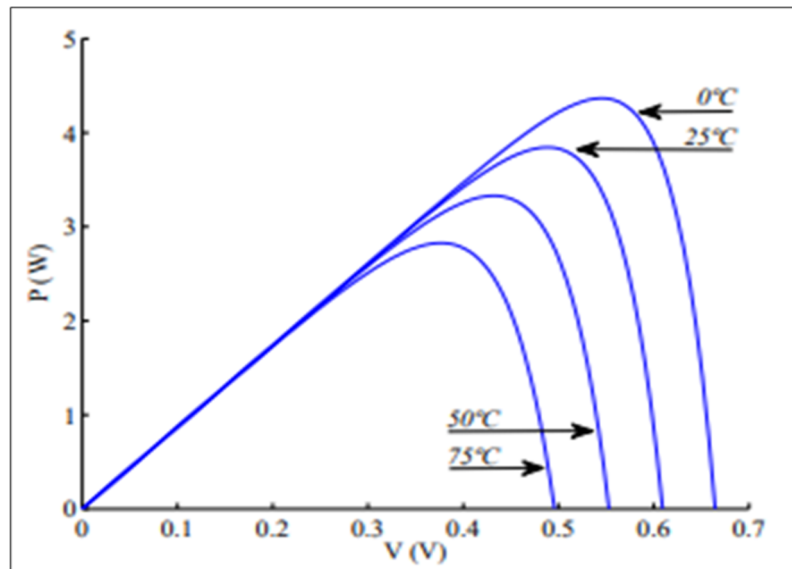


Figure 1.3 Évolution de la puissance photovoltaïque en fonction de la tension de sortie pour plusieurs températures tirée de Rodrigues & Melicio (2011, p. 3)

La puissance de sortie d'un système photovoltaïque dépend en grande partie de la quantité de rayonnement solaire qui peut être reçue par le panneau photovoltaïque. En effet, comme le montre la figure 1.4, le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue (l'irradiation solaire), alors que la tension de circuit ouvert varie légèrement avec la radiation solaire. L'augmentation du courant de court-circuit avec l'augmentation de la radiation solaire entraîne l'augmentation de la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque.

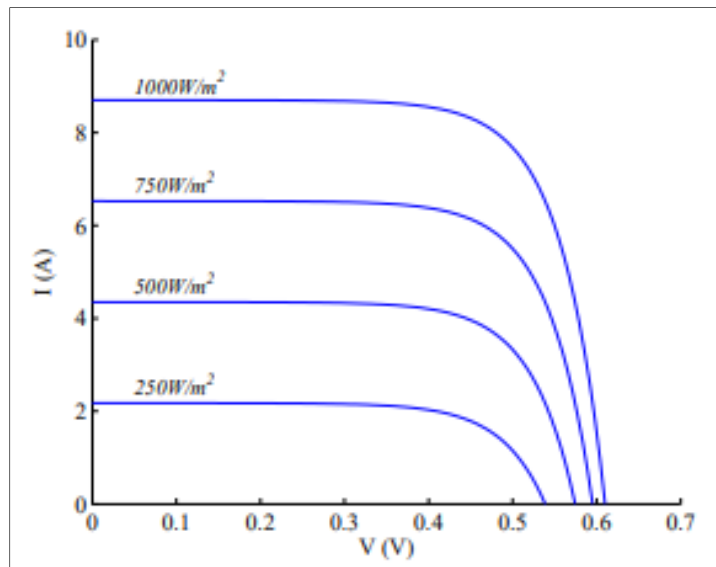


Figure 1.4 Caractéristique I-V d'un panneau Photovoltaïque pour plusieurs irradiances solaires tirée de Rodrigues & Melicio (2011, p. 3)

Étant donné que les caractéristiques courant-tension et puissance-tension dépendent des conditions environnementales, il est devenu essentiel de suivre le point de puissance maximale et de forcer le panneau photovoltaïque à fonctionner à une tension compatible avec ce point. Le MPPT qui est le suivi du point de puissance maximale est un algorithme de contrôle automatique utilisé pour ajuster les interfaces de puissance et obtenir la plus grande production d'énergie possible, pendant les variations instantanées du niveau de lumière, de l'ombrage, de la température et des caractéristiques du module photovoltaïque (Eltawil & Zhao, 2013).

L'utilisation des suiveurs de puissance maximale et des dispositifs de contrôle de l'alimentation dans les systèmes photovoltaïques tels que les convertisseurs DC/DC (courant continu/courant continu) et les onduleurs DC/AC (courant continu/courant alternatif) entraînent non seulement un coût et une complexité supplémentaire, mais aussi des pertes de puissance dans ces appareils, telles que les pertes de commutation et de conduction, qui réduisent leur efficacité (Azzolini & Tao, 2018; Elias et al., 2004).

La figure 1.5 montre que durant les dernières années les prix des panneaux photovoltaïques ont diminué plus rapidement que les prix des onduleurs.

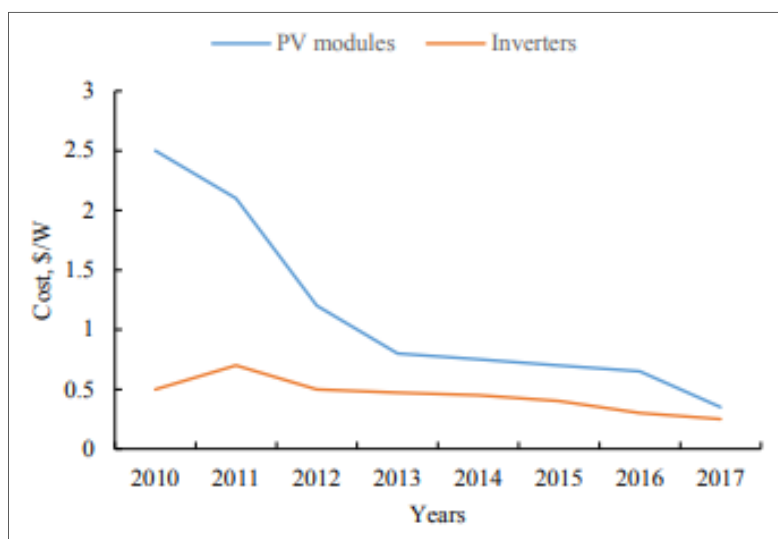


Figure 1.5 Évolution du cout par Watt des modules Photovoltaïque et des onduleurs entre l'année 2010 et 2017 tirée de Allik et al (2019, p. 371)

Par la suite, les systèmes photovoltaïques directement couplés, dans lesquels la charge est directement connectée au générateur photovoltaïque demeurent la meilleure solution pour avoir un coût et une complexité minimales (Azzolini & Tao, 2018).

Le problème dominant dans les systèmes photovoltaïques directement couplés est le décalage entre les points d'opération et la courbe de PV sous différentes radiation et températures. Afin d'assurer un fonctionnement aux alentours du point optimal, deux principales stratégies ont été étudiées dans la littérature : la première consiste à optimiser le dimensionnement de la charge autrement dit optimiser le nombre de charges connecté au générateur photovoltaïque (Azzolini & Tao, 2018), (Maroufmashat et al., 2014), (Atlam et al., 2011) et la deuxième consiste à optimiser le dimensionnement de modules photovoltaïque, autrement dit optimiser le nombre de cellules, les angles d'inclinaison...(Chandel et al., 2017), (Benghanem et al., 2013), (Kolhe et al., 2004).

Les systèmes photovoltaïques à couplage direct ont été développés pour plusieurs applications comme les systèmes de pompage d'eau et les systèmes de production d'Hydrogène par électrolyse d'eau. Cette approche <<low tech>> du branchement direct aspire à un meilleur rendement économique lorsque bien adapté à la consommation malgré un rendement énergétique plus faible qu'un système avec MPPT.

1.2.2 Intégration de l'énergie photovoltaïque dans les serres agricoles

Le concept de partage du rayonnement solaire entre l'agriculture et l'énergétique a gagné un intérêt depuis 1981 et a acquis un développement sous la forme de serres photovoltaïques. En effet, la superficie des serres aux niveaux mondiaux en janvier 2019 était estimée à 496 800 ha avec une puissance photovoltaïque totale installée à la fin des années 2018 dépasse 500 Gigawatt (Bostan et al., 2019). Cette technologie permet de réduire les coûts de consommation d'électricité.

Les architectures des serres photovoltaïques sont nombreuses. Il y a des architectures où l'énergie photovoltaïque est raccordée avec d'autres énergies renouvelables comme l'éolienne (Jomaa et al., 2018). Il y a aussi des serres photovoltaïques raccordées au réseau alimentant la serre de chauffage, de climatisation et d'éclairage sans cout énergétique (Dubrova, 2019). Selon cette étude, le cout énergétique nul est atteint lorsque la consommation annuelle de la serre est égale à la puissance produite par le groupe photovoltaïque sur une année. D'autres chercheurs ont travaillé sur des serres alimentées par un système photovoltaïque intelligent intégrant l'internet des objets afin d'obtenir en temps réel sur des interfaces dont les téléphones, le statut de courant de charge, capacité de batterie et le chargement du système photovoltaïque.

Les systèmes photovoltaïques ont été utilisés aussi dans les serres pour alimenter les systèmes de climatisation et les systèmes d'irrigation (Hassanien et al., 2016). L'utilisation des modules PV (module photovoltaïque) conventionnels provoque un ombrage à l'intérieur de la serre. Par conséquent, il peut être responsable d'une photosynthèse insuffisante des

cultures, ce qui entraîne un problème de productivité. En effet, les panneaux solaires situés sur les façades sud ne laissent passer que 40 % à 60 % de la lumière du soleil (Bostan et al., 2019). Une étude de faisabilité économique sur une serre du nord de la Sardaigne en Italie a montré que les PV transparents ou semi-transparentes représentent une très bonne solution pour réduire l'impact négatif de l'ombrage sur la productivité des cultures (Cossu et al., 2010).

1.2.3 La Géométrie solaire et intensité solaire incidente

La puissance photovoltaïque de sortie dépend directement de la quantité de rayonnement incidente sur la surface du panneau photovoltaïque qui n'est généralement pas horizontale, mais inclinée afin d'avoir une production d'énergie en fonction des latitudes et de meilleures conditions pour le refroidissement du module. Les phénomènes d'absorption et de diffusion par les molécules gazeuses, la vapeur d'eau et les particules atmosphériques solides ou liquides ainsi que la longueur de la trajectoire à travers l'atmosphère font atténuer le rayonnement solaire (Bekkouche, 2008).

Le rayonnement total reçu par la surface du module photovoltaïque se compose d'un rayonnement direct provenant du disque solaire, d'un rayonnement diffus provenant de la voûte céleste et d'un rayonnement réfléchi des différentes surfaces environnantes par exemple le sol (Hassan et al., 2017) comme illustré dans la figure 1.6.

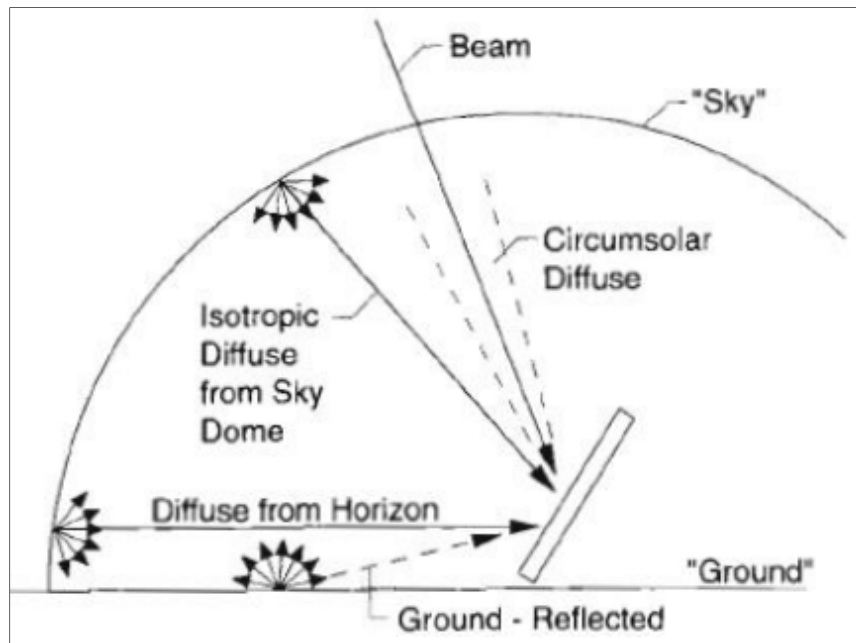


Figure 1.6 Schéma des trois composants du rayonnement incident sur une surface inclinée
tirée de Technologies Des Éoliennes (2020, p. 5)

Les composantes directes et réfléchies peuvent être calculées avec une bonne précision en utilisant des algorithmes simples, mais la nature de la partie diffuse est plus compliquée, car le rayonnement diffus n'a pas d'angle d'incidence défini sur une surface horizontale (Shivam & Singh, 2015). Plusieurs modèles existent qui tentent de corréler le rayonnement diffus sur une surface inclinée à celui mesuré sur une surface horizontale. Ces modèles sont classés selon les modèles de ciel, soit isotropes soit anisotropes (Shukla et al., 2015).

Selon les modèles isotropes, l'intensité du rayonnement diffus du ciel est uniforme sur le dôme céleste et par la suite le rayonnement diffus incident sur une surface inclinée dépend d'une fraction du dôme céleste vu par celle-ci. Selon les modèles anisotropes, la composante diffuse se compose d'une composante due au rayonnement diffus du ciel dans la région circumpolaire plus une composante diffuse distribuée de manière isotrope du reste du dôme du ciel plus la composante du diffus de l'horizon (Shukla et al., 2015) comme montré dans la figure 1.7 (M'raoui et al., 2011). Pour des conditions climatiques nuageuses, les modèles

isotropes sont les mieux adaptés puisque le rayonnement solaire direct est bloqué et le ciel est proche de l'isotrope.

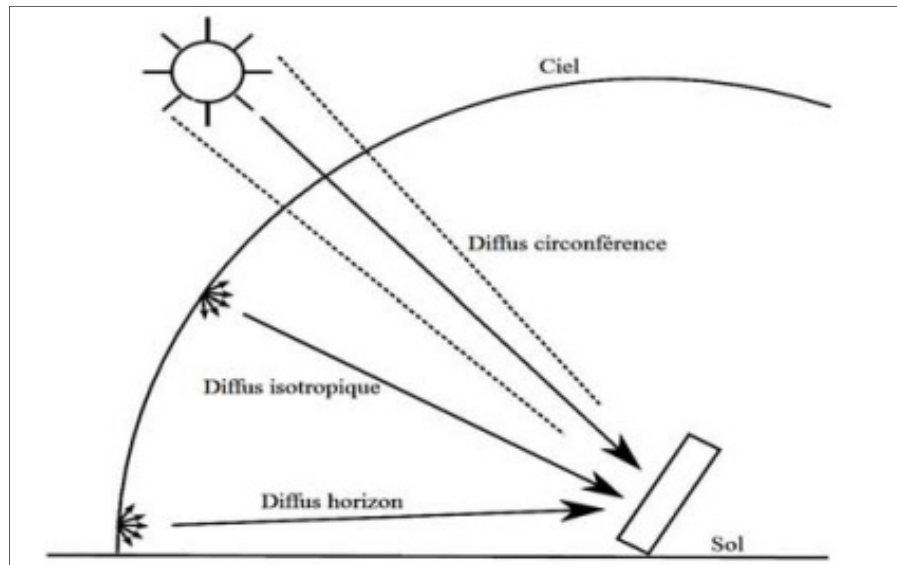


Figure 1.7 Schéma des trois composants du rayonnement diffus
tiré de M'raoui et al (2011, p. 641)

Parmi les modèles isotropes, il y a le modèle Liu et Jordan qui suppose que le rayonnement diffus est isotrope seulement, le modèle Koronakis qui a changé l'hypothèse du modèle Liu et Jordan en montrant que 66.7 % du rayonnement solaire diffus du dôme du ciel total est fourni par une inclinaison de 90 % et le modèle de Badescu qui prend en considération le facteur de forme (la part du rayonnement thermique émis par le ciel isotrope). Parmi les modèles anisotropes, il y a le modèle de Hay et de Reindl. Le premier modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est composé uniquement d'une composante isotrope et circumpolaire alors que le deuxième modèle prend en compte la composante du diffus de l'horizon (Shukla et al., 2015) (Shivam & Singh, 2015).

Ces modèles nécessitent la connaissance de plusieurs angles solaire comme paramètres d'entrées (Benkacali & Gairaa, 2015) (Rousse & Ph, n.d.):

- Angle de déclinaison solaire : C'est l'angle entre la normale sur le plan éclipitique et l'axe de rotation de la terre
- Angle horaire solaire : C'est l'angle entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical de la surface inclinée.
- Angle de latitude solaire : C'est un angle entre la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.
- Angle de zénith solaire : C'est un angle entre la direction du Soleil et la verticale (normale à la surface de la Terre)
- Angle de l'azimut solaire : C'est l'angle entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction du sud, compté négativement à l'est et positivement à l'ouest
- Pente de la surface : C'est l'angle d'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontale
- Azimut de la surface : C'est l'angle entre la projection horizontale de la normale à une surface et le méridien

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Après avoir introduit le contexte, les objectifs et présenté une revue de littérature, l'approche de conceptualisation, les hypothèses, la modélisation mathématique des systèmes de l'enceinte, de chauffage, d'éclairage et du solaire photovoltaïque sont présentées et détaillées dans ce chapitre.

2.1 Approche de modélisation

Le modèle développé s'intéresse principalement au dimensionnement du système photovoltaïque alimentant uniquement le système de chauffage et d'éclairage de la serre et au calcul de la puissance photovoltaïque produite, utilisée et stocké dans le but d'évaluer son intégration dans les serres agricoles. Afin de pouvoir dimensionner le système photovoltaïque, un modèle simplifié est proposé pour estimer d'une façon approximative le besoin en chauffage et éclairage dans la serre. Puisque l'objectif de la modélisation est essentiellement photovoltaïque, le calcul du besoin de chauffage est considéré comme un outil complémentaire au modèle photovoltaïque et est uniquement une approximation du besoin.

La méthodologie adoptée dans le présent travail se compose de trois étapes telles qu'illustrées dans la figure 2.1:

- Étape 1 : Collecte et saisie des données d'entrée :

Les données d'entrées correspondent aux conditions météorologiques, la position géographique, les propriétés thermiques et de construction de la serre opaque et conventionnelle, les propriétés des lampes d'éclairage, les conditions de cultures et les propriétés des panneaux photovoltaïques. Elles sont des variables indépendantes

considérées comme la base de tout le calcul établi par le modèle, saisies sous forme de tableau dans un fichier Excel en respectant les unités indiquées et importées par le modèle sur Matlab.

- Étape 2 : Développement du modèle sur le logiciel Matlab :

Le développement du modèle nécessite une modélisation mathématique des flux de puissance thermique dans les deux types de serre, des flux de puissance électrique dans les systèmes d'éclairage et photovoltaïque et des radiations solaires sur une surface inclinée. Ces notations mathématiques dépendent des données d'entrées et sont utilisées pour développer un algorithme sur l'environnement Matlab. Le modèle prend en compte le nombre d'étages dans la serre opaque et la possibilité de l'alternance de fonctionnement entre elles. L'utilisateur adopte le modèle conçu à son cas d'étude en variant seulement les données d'entrée sur le fichier Excel sans intervention direct sur l'algorithme développé.

- Étape 3 : Acquisition et traitement des résultats :

L'exécution de cet algorithme en variant les données d'entrée, permet d'obtenir des résultats bruts: horaire, mensuel et annuel exportés par le modèle dans un fichier Excel. Ces résultats sont : le besoin en éclairage et en chauffage d'une serre opaque et conventionnelle et la puissance photovoltaïque produite, utilisée, et stockée. À l'aide des outils disponibles dans Excel, les résultats sont traités, représentés et analysés à partir de tableaux et figures.

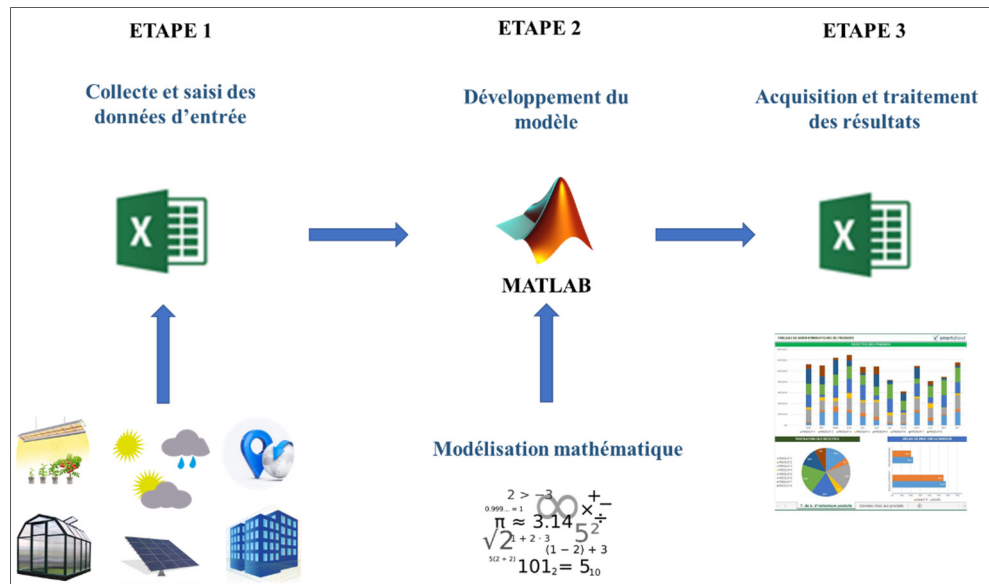


Figure 2.1 Schéma des étapes de modélisation

Le modèle est développé sur Matlab en suivant l'ordre décrit dans la figure 2.2 : après avoir importé les données saisies par l'utilisateur, la serre opaque et la serre conventionnelle sont modélisées séparément en deux entités indépendantes. Pour chaque type de serre, la puissance électrique du système d'éclairage est calculée en premier lieu, ensuite les flux de chaleur sont calculés pour estimer le besoin en chauffage. Ensuite, en se basant sur le besoin déjà calculé, le système photovoltaïque est dimensionné pour chaque type de serre. Le dimensionnement se divise à son tour en 3 parties : la première partie permet de calculer le nombre de panneaux à installer, la deuxième partie est consacrée aux calculs des radiations solaires sur les surfaces inclinées des panneaux photovoltaïques et la troisième permet de déterminer la puissance photovoltaïque produite, utilisée, stockée et la puissance tirée du réseau pour chaque heure sur toute l'année.

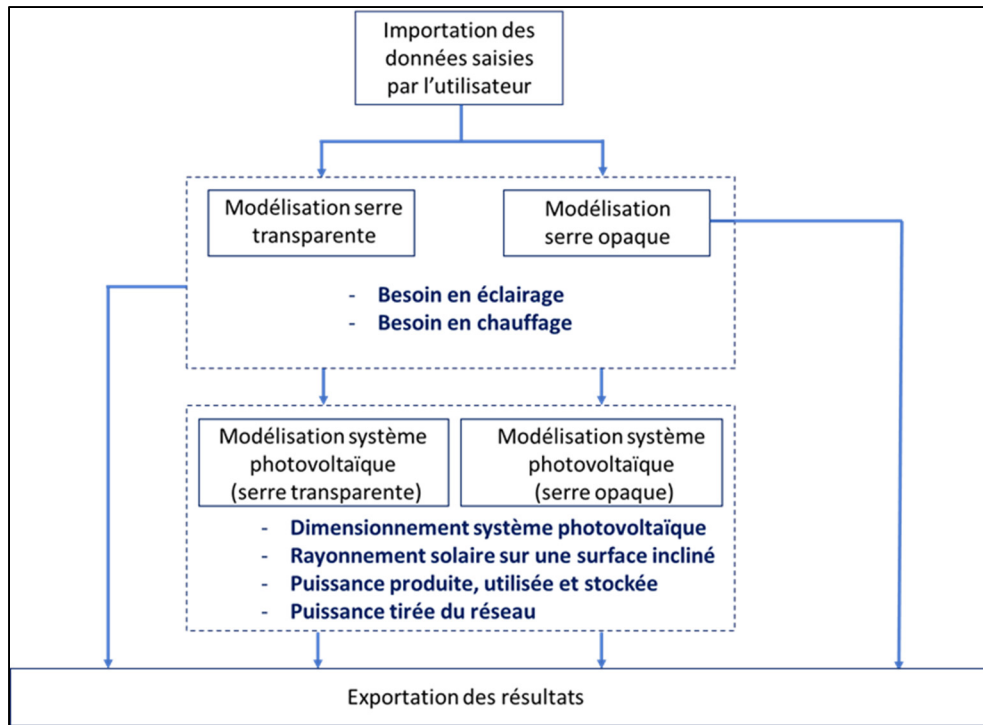


Figure 2.2 Résumé des étapes de développement du modèle sur Matlab

Finalement, le modèle sert à optimiser la photopériode et le nombre de panneaux photovoltaïques alimentant le système de chauffage et d'éclairage tout en assurant la moindre consommation d'une part et l'utilisation au maximum de l'énergie photovoltaïque de l'autre part. Le modèle peut aussi comparer la consommation approximative d'énergie par le système de chauffage et d'éclairage pour plusieurs cultures et positions géographiques.

2.2 Hypothèse et limitation de la modélisation

Étant donné que l'objectif essentiel du modèle est de savoir l'utilité d'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour chauffer et éclairer une serre transparente et opaque qui n'ont pas nécessairement besoin des mêmes apports énergétique, le modèle thermique intégré est un modèle simple et basique comportant plusieurs hypothèses simplificatrices. Ce dernier a pour but l'estimation de la consommation approximative du système de chauffage sans tenir compte du besoin en refroidissement. En effet le modèle thermique ne cherche pas à calculer la consommation d'énergie de chauffage exacte assurant des conditions climatiques parfaites

à la culture des plantes mais plutôt il permet d'avoir un exemple de consommation élémentaire et général. Le modèle thermique conçu même s'il n'est pas parfait, est considéré comme un outil au dimensionnement du système photovoltaïque et ne représente pas le but principal du projet.

Les hypothèses adoptées pour simplifier le modèle thermique sont les suivantes :

- La ventilation naturelle et forcée du refroidissement n'est pas prise en compte dans cette étude car l'objectif est d'estimer les besoins de chauffage. L'ajout de la ventilation dans le modèle thermique influencera l'énergie totale consommée mais le calcul précis de la consommation énergétique n'est pas le but de l'étude, donc elle n'est pas prise en considération. Seulement une infiltration d'air constante est envisagée pendant les jours et les nuits.
- La lumière naturelle transmise à l'intérieur de la serre n'est pas réfléchi sur les côtés de la serre.
- L'influence de l'échange de chaleur entre les plantes et l'environnement sur le besoin en chauffage de la serre n'est pas pris en compte. Même si cela n'est pas recommandé, dans plusieurs études l'interaction des plantes avec leur environnement a souvent été négligé lors de modélisation de l'espace agriculture (Sethi et al., 2013) .
- Les pertes et les gains pris en compte dans le modèle sont : les gains solaires, les gains du système d'éclairage, les pertes convectives et les pertes par infiltration.

Puisque le système photovoltaïque n'alimente pas le système de climatisation, les besoins en refroidissement ne sont pas discutés dans le présent travail. Le modèle thermique donne une idée sur les surplus de chaleur dans la serre parce qu'il arrive des journées où la température à l'intérieur est plus grande que la température de l'extérieur, mais ces surplus de chaleur obtenu n'ont aucun lien avec le dimensionnement du système photovoltaïque. Il est évident que ceci est une limite du modèle conçu qui pourrait être amélioré dans le cadre de continuité du projet.

Comme exemple possible d'application des surplus de chaleur, une partie a été intégrée calculant la quantité de surplus de chaleur qui pourrait être valorisé en chauffant un bâtiment. Cette proposition n'influence pas les résultats obtenus par le modèle thermique et photovoltaïque.

Le modèle et les résultats de cet exemple d'application sont détaillé en Annexe I et sont dépendants de la validité du modèle thermique.

2.3 Modélisation du système d'éclairage et chauffage dans une serre transparente et opaque

2.3.1 Modélisation de l'éclairage naturel et artificiel dans la serre

La mesure d'éclairage de référence utilisée dans l'opération des serres est l'intégral de l'éclairage journalier DLI en $\text{mol.m}^{-2}.\text{Jour}^{-1}$ qui est l'intégrale sur 24 heures du PPFD en $\mu\text{mol. s}^{-1}.\text{m}^{-2}$. Généralement dans les serres agricoles contrôlées, un éclairage artificiel est ajouté à l'éclairage naturel pour atteindre le DLI nécessaire à la croissance des plantes.

Le DLI de l'éclairage artificiel à ajouter est calculé selon l'équation 2.1 (Benis et al., 2017) :

$$DLI_{\text{éclairage_artificiel}} = DLI_{\text{lumière_plantes}} - DLI_{\text{lumière_naturelle}} \quad (2.1)$$

L'apport solaire à l'intérieur de la serre conventionnelle est affaibli par plusieurs facteurs. La lumière résultante à l'intérieur de la serre est égale à l'apport solaire multiplié par les facteurs d'affaiblissement. Ces facteurs sont (Bernard, 1987):

- Le coefficient de transmission : ce coefficient permet de quantifier la lumière qui a traversé le vitrage et a été transmis à l'intérieur.
- Facteur de vitrage : ce facteur permet de prendre en compte la proportion de menuiserie ou tout autre matériau opaque utilisé dans la construction de la serre.
- Pare-soleil : il fait diminuer les gains solaires en causant un ombrage. Il y a des serres qui n'utilisent pas le pare-soleil et d'autres qui utilisent un pare-soleil ajustable au besoin.

- Obstacles possibles à l'extérieur : plusieurs obstacles existent à l'extérieur et qui causent un affaiblissement comme des arbres, maisons, neige...

Dans le présent travail, seulement le coefficient de transmission et le facteur de vitrage sont pris en compte.

L'unité des rayonnements solaire est en $W.m^{-2}$. Par la suite l'apport solaire résultant à l'intérieur de la serre $I_{S_résultant}$ en $W.m^{-2}$ est calculé selon l'équation 2.2 :

$$I_{S_résultant} = I_S * F_V * T * 4.6 \quad (2.2)$$

Avec I_s est l'apport solaire en $W.m^{-2}$, F_v est le facteur de vitrage, T est la transmission de la serre et le coefficient 4,6 représente le facteur de conversion de $W.m^{-2}$ en $\mu mol. s^{-1}.m^{-2}$ (National & Pillars, 2003),(Talbot & Monfet, 2018),(Simon Chretien, n.d.),(Horti Generation, n.d.).

Pour calculer cet apport en $\mu mol. s^{-1}.m^{-2}$, une conversion est réalisée en utilisant l'équation 2.3 (National & Pillars, 2003),(Talbot & Monfet, 2018),(Simon Chretien, n.d.),(Horti Generation, n.d.):

$$1W.m^{-2} = 4.6 \mu mol. s^{-1}.m^{-2} \quad (2.3)$$

L'éclairage artificiel ajouté est calculé de façon à fournir un PPFD permettant d'atteindre durant la photopériode le DLI requis par la plante sans le dépasser. En fonction du PPFD supplémentaire à ajouter par les lampes ($PPFD_{\text{éclairage_artificiel}}$), la densité d'éclairage $P_{\text{éclairage}}$ en $W.m^{-2}$ est calculée à l'aide de l'équation 2.4 :

$$P_{\text{éclairage}} = PPFD_{\text{éclairage_artificiel}} * Nbr_{\text{étages}} * \frac{1}{PPE} \quad (2.4)$$

Avec $N_{br\acute{e}tages}$ représente le nombre d'étages dans la serre opaque tout en tenant compte que tous les étages ont des surfaces égales.

Avec PPE est l'efficacité du système d'éclairage en $\mu\text{mol. s}^{-1}.\text{W}$. Ce facteur dépend du type des lampes utilisé et leurs caractéristiques.

Tous les paramètre de calcul du besoin en éclairage utilisé dans le présent modèle sont présentés dans le paragraphe 3.5 du troisième chapitre.

2.3.2 Modélisation des besoins de la serre en chauffage

La chaleur produite par les rayonnements solaires est calculée à partir de l'équation 2.5 (Pelletier & Sc, 2017).

Cette chaleur est égale à l'intensité solaire horizontale I_i en W.m^{-2} multiplié par la surface du plancher de la serre A_i en m^2 et par les facteurs d'affaiblissement: facteur de vitrage F_v et la transmission du matériau de couverture de la serre T_i . Le gain solaire est nul dans les fermes verticales.

$$Q_{solaire} = A_i \times I_i \times T_i \times F_v \quad (2.5)$$

Les serres reçoivent une quantité importante de chaleur à partir du système d'éclairage supplémentaire. Cette chaleur est calculée selon l'équation 2.6 (Ahamed et al., 2018). Elle varie selon le type de lampes utilisé et représente 75 à 100 % de l'énergie thermique de l'éclairage artificiel.

$$Q_{\acute{e}clairage} = P_{\acute{e}clairage} \times A_i \times F_{hc} \times F_a \quad (2.6)$$

$P_{\acute{e}clairage}$ représente la puissance par unité de surface des lampes en W.m^{-2} , F_{hc} est le facteur de conversion thermique, A_i représente la surface de la serre et F_a est le facteur d'allocation

de lumière. Ce facteur est égal à 1 durant la photopériode c'est-à-dire la lumière artificielle est allumée.

La perte ou le gain de chaleur convectif à travers toutes les sections de la serre est calculé selon l'équation 2.7 (Kiyan et al., 2013),(S. Ahamed et al., 2018),(Leveille-Guillemette & Monfet, n.d.):

$$Q_{conduction,convection} = U \times A \times (T_{int} - T_{ext}) \quad (2.7)$$

Dans cette équation, A est la surface totale de toutes les sections de la serre en m², T_{ext} et T_{int} désignent respectivement la température à l'extérieur et la température de consigne à l'intérieure de la serre en °C et U représente le coefficient de transfert thermique global en W.m⁻².°C⁻¹ qui est la combinaison des effets de la conduction à travers les sections de la serre et de la convection aux surfaces intérieurs et extérieurs de celle-ci. Le coefficient U varie en fonction de la vitesse du vent, des propriétés des sections de la serre et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et il est calculé par l'équation 2.8 :

$$U = \left[\frac{1}{h_0} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h_i} \right]^{-1} \quad (2.8)$$

Avec h₀ et h_i sont les coefficients de transfert de chaleur convectif respectivement par l'intérieur et l'extérieur de la couverture de la serre en W.m⁻².C⁻¹. L_c est l'épaisseur de l'enveloppe de la serre en m et K_c est la conductivité thermique de la serre en W.m⁻¹.C⁻¹.

Les coefficients de transfert de chaleur convectif sont calculés en fonction du nombre de Nusselt qui est calculé à son tour soit en fonction du nombre de Reynolds et de Grashof soit du nombre de Grashof et Prandtl selon le type de convection : naturelle ou forcée.

Différente valeur de U pour les matériaux de couverture de serre sont données et suggéré par la littérature (Abdel-Ghany & Kozai, 2006),(Zhang et al., 1996),(Valera, M. D., Molina, A.

F., Alvarez, 2008),(FAO, 2017). Par exemple pour une serre en polyéthylène d'épaisseur égale à 0,2 mm, certaines valeurs du coefficient de transfert thermique global U rapportées variant de 3.4 ; 6.8 jusqu'à 7.14 W.m⁻².C⁻¹ (Abdel-Ghany & Kozai, 2006).

Une grande quantité de chaleur peut être perdue à travers le sol de la serre et est calculée en utilisant l'équation 2.9 (Ahamed et al., 2018), où T sol représente la température du sol tout en négligeant la fluctuation de la température du sol, Tint représente la température de consigne à l'intérieur, Ap désigne la surface du plancher en m² et U_{cond.plancher} est le coefficient de transfert thermique du plancher en W.K⁻¹.

$$Q_{conduction_{plancher}} = U_{cond_{plancher}} \times Ap \times (Tint - T_{sol}) \quad (2.9)$$

L'échange d'air dans la serre transfère une grande quantité de chaleur vers l'extérieur. Cette chaleur est calculée selon l'équation 2.10 (M. S. Ahamed et al., 2018) à l'intérieur de laquelle ACH symbolise le nombre d'échange d'air par heure, Vserre représente le volume de la serre en m³, Cair est la capacité thermique massique de l'air en J.K⁻¹.kg⁻¹, pair est la masse volumique de l'air en kg.m⁻³, Text désigne la température extérieure et Tint la température de consigne à l'intérieure.

$$Q_{infiltration} = \rho_{air} \times Cair \times Vserre \times ACH \times (Tint - Text) \quad (2.10)$$

Le besoin en chauffage à l'intérieur de la serre est calculé selon l'équation 2.11 :

$$Q + Q_{solaire} + Q_{éclairage} = Q_{conduction,convection} + Q_{conduction_{plancher}} + Q_{infiltration} \quad (2.11)$$

Une valeur Q positive indique qu'un chauffage supplémentaire est nécessaire dans la serre, tandis qu'une valeur négative indique des besoins de refroidissement. Le modèle du présent travail ne considère pas le mode de refroidissement et s'intéresse au calcul des besoins en chauffage seulement.

2.4 Modélisation du système photovoltaïque

Cette partie est consacrée aux dimensionnements du système photovoltaïque et le calcul de la puissance photovoltaïque produite, utilisée et stockée en se basant sur le calcul de l'intensité solaire sur les surfaces inclinées des panneaux photovoltaïques.

2.4.1 Dimensionnement du système photovoltaïque

Le dimensionnement du système photovoltaïque à couplage direct se fait en 3 étapes : premièrement, le besoin en chauffage et éclairage est calculé (paragraphe 2.3), deuxièmement la puissance d'un panneau photovoltaïque est corrigée selon les conditions d'opération et troisièmement la puissance installée ainsi que le nombre de panneaux sont calculées.

Une surface photovoltaïque d'un watt crête peut fournir un watt de puissance dans des conditions standards STC, c'est-à-dire :

- Une irradiation solaire de l'ordre d'une puissance de $1\,000\text{ W.m}^{-2}$
 - Une température des panneaux de 25°C
 - Un rayonnement solaire traversant 1,5 fois l'épaisseur de la couche atmosphérique.
- Le rayonnement arrive avec une inclinaison de 45° à travers un ciel parfaitement dégagé.

En réalité, les modules photovoltaïques opèrent à des températures et à des conditions d'insolation différentes à celles imposées par les conditions standards. La puissance d'un module solaire corrigée selon la température d'opération réelle peut être estimée par l'équation 2.12 (Abdelhamid, 2020):

$$P_{pv_{\max}} = P_{pv_max_STC} \times (1 - C \times \Delta T) \quad (2.12)$$

$P_{pv_max_STC}$ correspond à la puissance maximale délivrée par un panneau photovoltaïque aux conditions standards, ΔT désigne la différence entre la température d'opération et la

température aux conditions standards et C est le coefficient de température. Ce coefficient est exprimé en pourcentage de diminution de la production pour chaque augmentation de 1 degré Celsius.

L'énergie journalière à produire par le système photovoltaïque est calculée selon l'équation 2.13. Elle dépend du rendement du couplage direct η_{direct} , du besoin en éclairage et chauffage par jour $E_{consommation}$ en Wh et du nombre d'heures d'ensoleillement par jour nb_heures .

$$P_{pv_installé} = \frac{E_{consommation}}{(nb_heures * \eta_{direct})} \quad (2.13)$$

Le nombre de panneaux solaire à installer est estimé par la suite par l'équation 2.14 :

$$N_{pv} = \frac{P_{pv_installé}}{P_{pv_max}} \quad (2.14)$$

2.4.2 Calcul de l'intensité solaire sur les surfaces inclinées

Afin d'estimer l'intensité solaire sur les surfaces inclinées, un calcul préliminaire des différents angles solaire est nécessaire comme l'angle horaire, l'angle de zénith et l'angle d'incidence.

L'angle horaire correspond au déplacement du soleil de l'est à l'ouest par rapport au méridien local dû à la rotation de la terre à 15° par heure sur son axe. Elle est positive de midi solaire réel jusqu'au coucher du soleil et négative du lever du soleil jusqu'à midi réel. Cet angle est calculé par l'équation 2.15 où T_s représente le temps solaire qui est différent du temps standard donné par l'équation 2.16 (Hassan et al., 2017):

$$W = (T_s - 12) \times 15 \quad (2.15)$$

$$T_s = T_c + \left(\frac{\lambda}{15}\right) + E - Zc \quad (2.16)$$

Avec T_c qui désigne le temps standard, λ est la longitude, Z_c est le fuseau horaire en heures à l'est de GMT et E est l'équation du temps calculé selon l'équation 2.17 (Rousse & Ph, n.d.):

$$E = 9.87 \times \sin(2 \times B) - 7.5 \times \cos(B) - 1.5 \times \sin(B) \quad (2.17)$$

Où B est la fonction du jour de l'année, donnée par l'équation 2.18 (Hassan et al., 2017) et dépend du nombre de la journée de l'année n comme montré dans le tableau 2.1 pris et traduit de (Rousse & Ph, n.d.):

$$B = (n - 1) \times \left(\frac{360}{365} \right) \quad (2.18)$$

Tableau 2.1 Valeur de n par mois

Mois	n pour la i ^{ème} journée	Pour un jour du mois	
		Date	n
Janvier	i	17	17
Février	31 + i	16	47
Mars	59 + i	16	75
Avril	90 + i	15	105
Mai	120 + i	15	135
Juin	151 + i	11	162
Juillet	181 + i	17	198
Aout	212 + i	16	228
Septembre	243 + i	15	258
Octobre	273 + i	15	288
Novembre	304 + i	14	318
Décembre	334 + i	10	344

L'angle de Zénith θ_z du rayonnement direct est donné par l'équation 2.19 (Hassan et al., 2017):

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(W) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \quad (2.19)$$

Où ϕ est la latitude et δ est la position de déclinaison solaire du midi solaire par rapport au plan de l'équateur, qui est estimé en utilisant l'équation 2.20 comme suit (Hassan et al., 2017):

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right) \times (n + 284)\right) \quad (2.20)$$

L'angle d'incidence permet de déterminer la quantité maximale de soleil qui sera interceptée par une surface. Elle est calculée à l'aide de l'équation 2.21 (Rousse & Ph, n.d.):

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \times \sin(\phi) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\phi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \times \cos(\phi) \times \cos(\beta) \times \cos(W) \\ & + \cos(\delta) \times \sin(\phi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) \times \cos(W) \\ & + \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \sin(\gamma) \times \sin(W) \end{aligned} \quad (2.21)$$

L'irradiation globale inclinée est constituée de 3 composantes : une composante directe G_{bi} , une composante diffuse G_{di} et une composante réfléchie G_{ri} et elle se calcule selon l'équation 2.22 (Kerkouche et al., 2013):

$$GT_i = G_{bi} + G_{di} + G_{ri} \quad (2.22)$$

La composante directe est donnée par l'équation 2.23 (Kerkouche et al., 2013):

$$G_{bi} = R_b \times GBH \quad (2.23)$$

Avec GBH représente la composante directe de rayonnement solaire horizontale et R_b est calculé par l'équation 2.24 (Kerkouche et al., 2013):

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (2.24)$$

La composante réfléchie est estimée selon l'équation 2.25 (Kerkouche et al., 2013):

$$G_{ri} = \rho \times GH \times \frac{(1 - \cos(\beta))}{2} \quad (2.25)$$

Où ρ désigne le coefficient de réflexion de la lumière diffuse du sol, β correspond à l'angle d'inclinaison et GH est la radiation solaire horizontale globale.

La composante diffuse est donnée par l'équation 2.26 (Kerkouche et al., 2013):

$$G_{di} = R_d \times GDH \quad (2.26)$$

Avec GDH représente la composante diffuse de radiation solaire horizontale et R_d est calculé par l'équation 2.27 (Petros Axaopoulos, n.d.):

$$R_d = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (2.27)$$

La somme de la composante directe GBH est diffuse GDH du radiation solaire horizontale est appelé radiation solaire globale représentée par l'équation 2.28 (Hassan et al., 2017) :

$$GH = GBH + GDH \quad (2.28)$$

GBH et GDH sont estimés à l'aide de l'indice de clarté K. C'est le rapport entre l'irradiation solaire totale et l'irradiation extraterrestre sur une surface horizontale calculé par l'équation 2.29 (Kerkouche et al., 2013).

$$K = \frac{GH}{G_0} \quad (2.29)$$

G_0 désigne l'irradiance extraterrestre horizontale horaire estimée par l'équation 2.30 et dépend de l'angle de zénith θ_z et l'irradiation extraterrestre normale horaire G_{0n} calculé selon l'équation 2.31 où G_{sc} est la constante solaire 1.367 kW.m^{-2} (Hassan et al., 2017).

$$G_0 = G_{0n} \times \cos(\theta_z) \quad (2.30)$$

$$G_{0n} = G_{sc} \times \left(1 + 0.03344 \times \cos\left(\frac{360 \times n}{365}\right) \right) \quad (2.31)$$

Selon la valeur de l'indice de clarté, le rapport de l'irradiation diffuse horizontale sur l'irradiation globale est donné par les équations 2.32, 2.33 et 2.34 suivants (Kerkouche et al., 2013) :

Si $0 \leq K \leq 0.175$:

$$\frac{GDH}{GH} = 1 - 0.232 \times K \quad (2.32)$$

Si $0.175 \leq K \leq 0.87$:

$$\frac{GDH}{GH} = 1.17 - 1.23 \times K \quad (2.33)$$

Si $K > 0.87$:

$$\frac{GDH}{GH} = 0.203 \quad (2.34)$$

2.4.3 Calcul de la puissance photovoltaïque produite, utilisée et à stocker

Après avoir calculé la radiation solaire totale incidente sur la surface inclinée des panneaux photovoltaïques et avec la connaissance de leur température, la puissance photovoltaïque produite chaque heure est estimée par l'équation 2.35 (Hassan et al., 2017):

$$P_{pv_produite} = \eta_{direct} \times N_{pv} \times P_{STC} \times f_{pv} \times (1 + C \times (T - T_{STC})) \times \left(\frac{GT_i}{G_{STC}} \right) \quad (2.35)$$

Avec η_{direct} est le rendement du couplage direct, N_{pv} le nombre de panneaux installé, P_{STC} , T_{STC} et G_{STC} sont respectivement la puissance de sortie, la température et la radiation solaire d'un panneau dans les conditions standard, f_{pv} est le facteur qui prend en compte les facteurs affectant les panneaux photovoltaïques comme la poussière, la neige ..., C représente le coefficient de température, T est la température horaire extérieur et GT_i est la radiation incidente sur la surface inclinée.

Une simple comparaison entre la puissance photovoltaïque horaire produite et le besoin horaire en éclairage et en chauffage permet de calculer la puissance photovoltaïque horaire utilisé, à stocker et la puissance horaire tirée du réseau comme montré dans la figure 2.3.

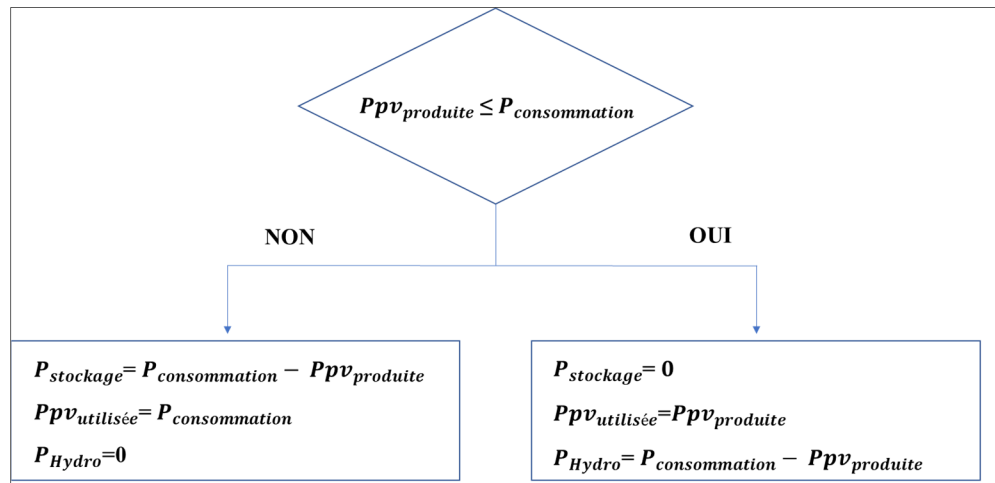


Figure 2.3 Organigramme de calcul de l'énergie photovoltaïque utilisée, à stocker et l'énergie tirée du réseau

CHAPITRE 3

COLLECTE DES DONNÉES

Ce chapitre est consacré en premier lieu à la présentation des données exploitées dans la simulation du modèle développé sur Matlab : les données météorologiques, les conditions de culture, les propriétés des serres et du système photovoltaïque. En deuxième lieu, le plan de simulation suivi est dévoilé en détaillant les objectifs, les variables modifiées et les conditions de simulation.

3.1 Données météorologiques

Les données météorologiques sont entrées par l'utilisateur sous forme d'un tableau sur Excel de dimension $[N,5]$. N désigne le nombre d'heures sur toute l'année et 5 représente le nombre de colonnes dans lesquelles les mois, les heures, les températures en $^{\circ}\text{C}$ et les rayonnements solaires horizontaux en W.m^{-2} sont inscrites comme l'exemple montré dans le tableau 3.1.

En ce qui concerne les données de températures, elles sont prises directement du site officiel du gouvernement Canada, elles sont gratuites et accessibles pour tous les utilisateurs. Pour les données d'ensoleillement, elles ne sont pas accessibles pour tous les utilisateurs et ont été achetées de l'établissement Environnement Canada.

Une base de données météorologiques est formée et utilisée dans le modèle Matlab qui se compose des données météorologiques de trois emplacements différents : Montréal-Est, Jonquière et La Grande.

Tableau 3.1 Exemple de données météorologiques
saisies par l'utilisateur sur Excel

Mois	Jour	Heure	Température	Ensoleillement
1	1	0	-10,9	0
1	1	1	-10,7	0
1	1	2	-11	0
1	1	3	-11,3	0
1	1	4	-11,6	0
1	1	5	-11,9	0
1	1	6	-12	0
1	1	7	-11,8	0
1	1	8	-11,7	3,61
1	1	9	-11,4	25,27
1	1	10	-11,2	52,5
1	1	11	-10,9	87,5
1	1	12	-10,7	102,77
1	1	13	-10,4	151,66
1	1	14	-10,2	131,38
1	1	15	-10	82,22
1	1	16	-9,9	29,44
1	1	17	-9,8	0
1	1	18	-9,8	0
1	1	19	-9,9	0
1	1	20	-9,6	0
1	1	21	-9,5	0
1	1	22	-9,7	0
1	1	23	-9,5	0

3.2 Condition de culture

Les conditions de culture sont les conditions climatiques et les conditions d'éclairage qui favorise la croissance des plantes. Dans le présent modèle, les conditions de cultures prises en considération sont : la température en photopériode et période obscure, la densité de flux de photons photosynthétiques et la photopériode.

Le modèle sur Matlab a été simulé pour deux types de plantes : fraise et tomates. Elles sont deux cultures importante : En effet, les tomates représentent le principal légume cultivé dans

la serriculture québécoise comme montré dans la figure 3.1 (gouvernement du Québec, n.d.) et le Québec est la 1ère province productrice de fraises au Canada.

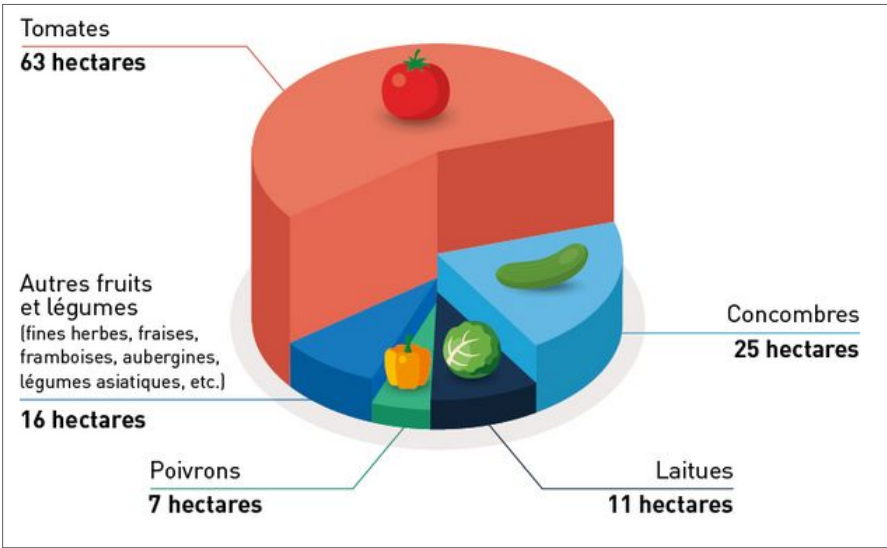


Figure 3.1 Principaux fruits et légumes produits en serre au Québec
tirée du site du Gouvernement de Québec

Les conditions de culture des fraises et tomates sont récapitulées dans le tableau 3.2 (*Culture Des Tomates En Sol Ou Hors-Sol, En Serre*, n.d.), (*Culture Des Fraises En Serre - Hors-Sol et Gestion Du Climat - Caldor*, n.d.), (*Grand Opening of SARA Project in Japan*, n.d.), (*Guide to Indoor Strawberry Cultivation*, n.d.), (National & Pillars, 2003), (Turcotte et al., 2015) :

Tableau 3.2 Conditions de culture des fraises et des tomates

Type de culture	Température de Jour (°C)	Température de Nuit (°C)	Photopériode (heure)	DLI (mol./m².jour)
Tomate	22	18	12	10-30
Fraise	18	13	8	17-25

3.3 Propriétés des serres

Le modèle est simulé pour deux types de serres : transparente et opaque. Les propriétés thermiques et structurales sont importantes pour le calcul des pertes et gains de chaleur et le besoin d'éclairage. Les propriétés thermiques sont le taux d'infiltration d'air, le coefficient de transfert thermique global (U), et les propriétés structurales sont le nombre d'étages de culture, le volume de la serre, la fraction de vitrage, la transmission du matériau de couverture de la serre et la surface de la serre. Ces données sont entrées par l'utilisateur dans un fichier Excel.

La structure de la serre intégrée au modèle est comme indiqué dans la figure 3.2 pour les deux types de serre, Ils diffèrent par le type de matériaux et ont un volume égal à 90 m³. Les deux types de serres sont orientées plein sud.

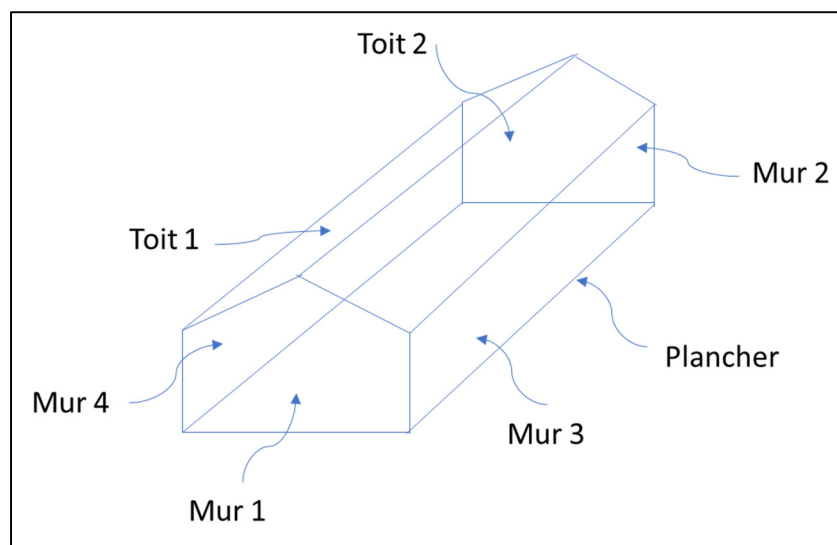


Figure 3.2 Structure de la serre transparente et opaque

Pour la serre conventionnelle totalement transparente, le matériau de couverture utilisé est le polyéthylène double, et le sol est considéré comme plancher. Pour la serre opaque, les murs sont formés de structures panneaux isolés (SIP), une dalle est considérée comme plancher. Les caractéristiques structurales et thermiques des deux types de serres sont récapitulées

respectivement dans le tableau 3.3 et le tableau 3.4 (*Expérience* , n.d.), (Durable, 2009),(Abdel-Ghany & Kozai, 2006),(Leveille-Guillemette & Monfét, n.d.):

Tableau 3.3 Caractéristiques structural des deux types de serres

Type de Serre	Surface serre (m ²)	Surface plantes (m ²)	Transmission	Fraction de vitrage	ACH	Nombre d'étages de culture
Serre conventionnelle	30	25	0.87	0.8	0.5	1
Serre Opaque	30	25	0	0	0.5	1 ou plus

Tableau 3.4 Caractéristiques thermique des deux types de serres

	Surface (m ²)	U Serre conventionnelle (W.m ⁻² .C ⁻¹)	U Serre opaque (W.m ⁻² .C ⁻¹)
Plancher	30	1.32	1.76
Mur 1	8	4	0.151
Mur 2	8	4	0.151
Mur 3	20	4	0.151
Mur 4	20	4	0.151
Toit 1	20	4	0.151
Toit 2	20	4	0.151

3.4 Caractéristiques des panneaux photovoltaïques

Le panneau photovoltaïque considéré dans la simulation est le panneau type JKM265P60. Les caractéristiques saisies dans le fichier de donnée Excel du panneau sont présentées dans le tableau 3.5. Une orientation des panneaux plein sud est sélectionnée par la suite et l'angle de l'azimut est égale à 0°C.

Tableau 3.5 Caractéristique des panneaux photovoltaïques

Panneau photovoltaïque Type JKM265P60	
Puissance maximale au STC (W)	250
Coefficient de température de puissance ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0.0041
Température au STC ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	25
Ensoleillement au STC (W.m^{-2})	1000
Angle d'inclinaison ($^{\circ}$)	Égale à l'angle de latitude
Angle d'azimut ($^{\circ}$)	0
Latitude ($^{\circ}$)	Dépend de la position géographique
Rendement du couplage direct (%/100)	0.8
Facteur de réduction de puissance (%/100)	0.85
Nombre d'heures d'ensoleillement (heures)	Dépend de la position géographique

3.5 Système d'éclairage artificiel

Des lampes LED sont désignées pour lancer les simulations du modèle. La seule caractéristique à saisir dans le fichier Excel est le facteur de conversion permettant de déterminer la puissance utilisée par la lampe en Watt pour produire 1 μmol . D'après plusieurs fiches techniques des lampes LED utilisées spécialement dans le domaine d'agriculture a montré que le rendement lumineux peut aller jusqu'à $2.5\mu\text{mol.s}^{-1}/\text{W}$ (*Éclairage Pour Serre - Extreme GreenLine G1 - Plantekno Plant and Agricultural Technology Co. Ltd. - à LED*, n.d.). Le facteur PPE d'efficacité utilisé dans le présent travail est égale à $2.3.\mu\text{mol.s}^{-1}/\text{W}$ issu de la fiche technique d'une lampe LED de la marque lumigrow (Weight, 2018).

Pour les lampes LED, la portion de puissance convertie en chaleur varie entre 65% et 90% (*DOSSIER LED - ETAP*, 2018), (Ye et al., 2011), (*SVETECH Light Longer*, n.d.), (*Énergie*, n.d.). Le facteur de conversion Fhc utilisé dans le présent travail est égale à 0.8. Concernant le facteur d'allocation de lumière Fa il est égale à 1 lorsque l'éclairage est allumé et égale à 0 lorsque l'éclairage est éteint.

Pour la culture des tomates, le DLI optimal fixé est égale à $11 \text{ mol.m}^{-2}.\text{Jour}^{-1}$. Dans la serre transparente, les lampes LED sont allumés au besoin pour assurer un PPFD total incluant

l'apport solaire égale à $254 \mu\text{mol. s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ durant la photopériode de 12 heures sans dépasser le DLI optimal fixé. Alors que dans la serre opaque, les lampes LED sont toujours allumées durant la photopériode de 12 heures fournissant un PPFD constant égale à $254 \mu\text{mol. s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ sans dépasser le DLI optimal fixé.

Pour la culture des fraises, le DLI optimal fixé est égale à $20 \text{ mol}.\text{m}^{-2}.\text{Jour}^{-1}$. Dans la serre transparente, les lampes LED sont allumées au besoin pour assurer un PPFD total incluant l'apport solaire égale à $694 \mu\text{mol. s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ durant la photopériode de 8 heures sans dépasser le DLI optimal fixé. Alors que dans la serre opaque, les lampes LED sont toujours allumées durant la photopériode de 6 heures fournissant un PPFD constant égale à $694 \mu\text{mol. s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ sans dépasser le DLI optimal fixé.

3.6 Plan de simulation

Le modèle développé sur Matlab est simulé en modifiant les variables d'entrées. Il a été permis de synthétiser en neuf principales simulations effectuées qui ont pour objectif :

- Simulation 1 : Étudier la différence de besoin en chauffage et éclairage selon le type de serre (serre opaque et conventionnelle).
- Simulation 2 : Étudier la différence de besoin en chauffage et éclairage selon le lieu géographique.
- Simulation 3 : Étudier l'impact de la variation des types de cultures (fraises et tomates) sur le besoin en chauffage et éclairage.
- Simulation 4 : Étudier l'impact de l'ajout du PV sur la consommation d'énergie du réseau. Un système photovoltaïque directement couplé est ajouté dans les serres pour alimenter le système d'éclairage et chauffage.
- Simulation 5 : Étudier l'impact de la variation du nombre d'étages de cultures dans le même volume de serre sur le besoin en chauffage et éclairage.

- Simulation 6 : Étudier l'impact de l'alternance de l'éclairage entre les étages de cultures sur le besoin en chauffage et éclairage et déterminer la photopériode assurant une moindre consommation.
- Simulation 7 : Étudier l'impact de l'ajout du PV direct pour l'éclairage et chauffage sur la consommation d'énergie du réseau pour serre à 1, 2 et 3 étages. Et optimiser le nombre de panneaux en se basant sur la photopériode permettant la moindre consommation d'énergie du réseau pour une serre à 1, 2 et 3 étages déterminée dans la simulation 6.
- Simulation 8 : Optimiser les photopériodes en se basant sur le rendement du système photovoltaïque le plus élevé pour une serre à 1, 2 et 3 niveaux.

Les variables modifiées et les conditions pour chaque simulation sont décrites dans le tableau 3.6 :

Tableau 3.6 Tableau détaillant les variables modifiées, types de serre et les conditions de simulation pour chaque simulation

N°	Variables modifiées	Type de Serre	Conditions de simulation
1	Type de serre	Conventionnelle Opaque	*Un étage de culture, Culture de tomates *Isolations aux normes *Position géographique fixe : Montréal-Est *Photopériode entre 5h et 17h
2	Quatre positions géographiques différentes	Conventionnelle Opaque	*Un étage de culture, Culture de tomates *Isolations aux normes *Photopériode entre 5h et 17h
3	Types de cultures : fraises et tomates	Conventionnelle Opaque	*Un étage de culture, Isolation aux normes *Position géographique fixe : Jonquière *Photopériode tomates entre 5h et 17h *Photopériode fraise entre 8h et 16h
4	Puissance PV.	Conventionnelle Opaque	*Un étage de culture, Culture de tomates *Isolations aux normes *Position géographique fixe : Jonquière *Photopériode entre 5h et 17h
5	Nombre d'étages de culture : 1, 2 et 3 Intervalle de photopériode	Opaque seule	*Culture des fraises, Isolations aux normes *Éclairage tous les étages à la fois *Position géographique fixe : Jonquière
6	Alternance de l'éclairage Nombre d'étages de culture : 2 et 3	Opaque seule	*Culture des fraises, Isolations aux normes *Position géographique fixe : Jonquière
7	Puissance PV	Opaque seule	*Culture des fraises, Isolations aux normes *Position géographique fixe : Jonquière *Photopériode optimale déterminée dans la simulation 6
8	Puissance PV Alternance de l'éclairage	Opaque seule	*Culture des fraises *Isolations aux normes *Position géographique fixe : Jonquière

CHAPITRE 4

RÉSULTAT ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, les résultats et les interprétations des simulations sont exposés en se basant sur les données d'entrée présentées dans le chapitre 3 et en suivant les scénarios de simulation. Premièrement, une comparaison de la consommation d'énergie dans la serre à un seul étage de culture est établie en modifiant le type de culture, la position géographique et le type de serre. Deuxièmement, l'intégration des systèmes photovoltaïque et son influence sur la puissance tirée du réseau sont étudiées. Ensuite, la consommation d'énergie dans la serre est analysée en ajoutant des étages de culture et en prenant en compte l'alternance de fonctionnement et l'intégration du système photovoltaïque. En se basant sur cette analyse, une photopériode optimale et un nombre de panneaux photovoltaïques optimale à installer est déterminé.

4.1 Différence de besoin en chauffage et éclairage dans la serre opaque et transparente

Pour étudier la différence de besoin en chauffage et éclairage dans la serre opaque et conventionnelle, la simulation 1 a été lancée.

La figure 4.1 présente le besoin en chauffage et éclairage ainsi que le besoin total dans les deux types de serres : opaque et transparente qui sont spécialisés dans la même culture (tomates) et situés dans la même position géographique (Montréal). Le besoin en éclairage est plus élevé dans la serre opaque de 14 MWh puisque celle-ci ne bénéficie pas des rayonnements solaires sur toute l'année. Cependant, elle a besoin beaucoup moins d'énergie pour chauffer (une différence de 28.33 MWh entre les deux types de serres). D'une part parce que la serre opaque utilise que l'éclairage artificiel qui diffuse la chaleur et compense le besoin en chauffage et d'autre part parce qu'elle est mieux isolée par rapport à la serre transparente durant l'hiver. En effet, le coefficient de résistance thermique est plus élevé dans

le cas de la serre opaque. Plus le facteur RSI du matériau de couverture est élevé, plus il est efficace en ne laissant pas pénétrer la chaleur et le froid. Ceci reflète un besoin en chauffage et éclairage totale annuel par la serre transparente égale à 32.1MWh plus grands que celui de la serre opaque qui est égale à 3.8 MWh.

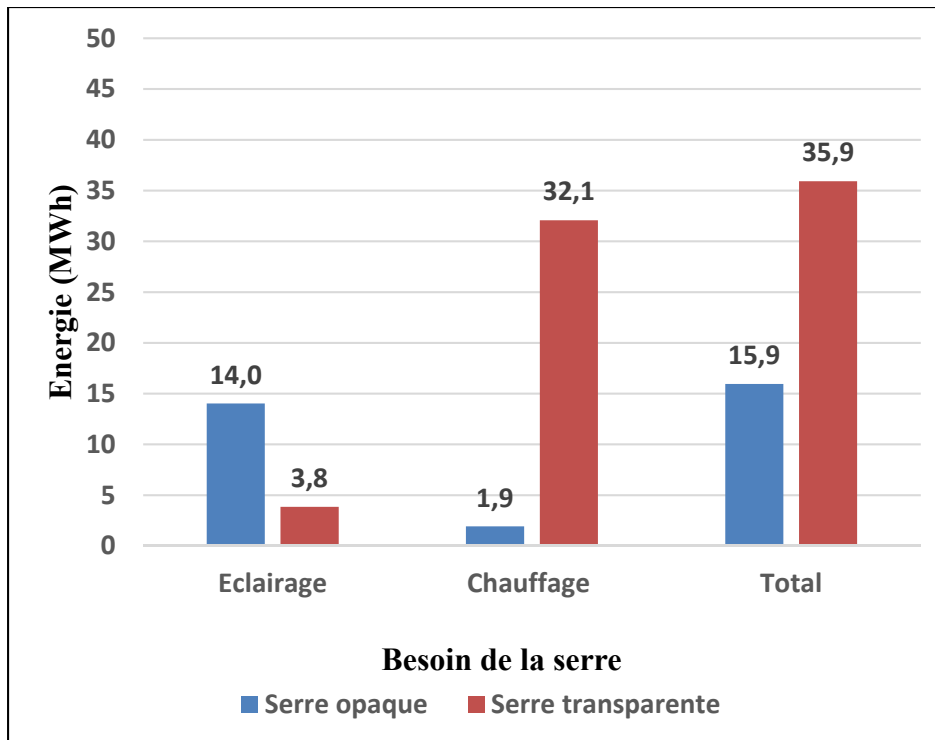


Figure 4.1 Besoin en éclairage et chauffage
(Serre opaque et transparente à Montréal, culture des tomates)

La serre opaque est beaucoup moins énergivore que la serre transparente. De point de vue consommation d'énergie par le système d'éclairage, la serre transparente est avantageuse. En revanche, elle est facilement influencée par le climat ce qui fait augmenter drastiquement le besoin en chauffage durant l'hiver.

4.2 Comparaison du besoin en chauffage avec la littérature

Le besoin en chauffage pour les deux types de serre a été calculé en se basant sur des données météorologiques fournies par Environnement Canada et sur plusieurs

caractéristiques thermique, électrique et structurale choisis par l'utilisateur. Le besoin en chauffage a été calculé par le modèle thermique sans prendre en considération les pertes par ventilation et évapotranspiration.

La figure 4.2 représente le besoin en chauffage mensuel d'une serre conventionnelle calculé par le modèle thermique développé dans le présent travail en MJ/m². La figure 4.3 représente le besoin en chauffage de d'une serre à Saskatoon dédiée à la culture de tomates dans une serre conventionnelle (M. S. Ahamed, Guo, Taylor, et al., 2019). La comparaison entre les figures montre que le besoin en chauffage calculé dans le présent travail évolue dans la même allure que celle de la figure de référence.

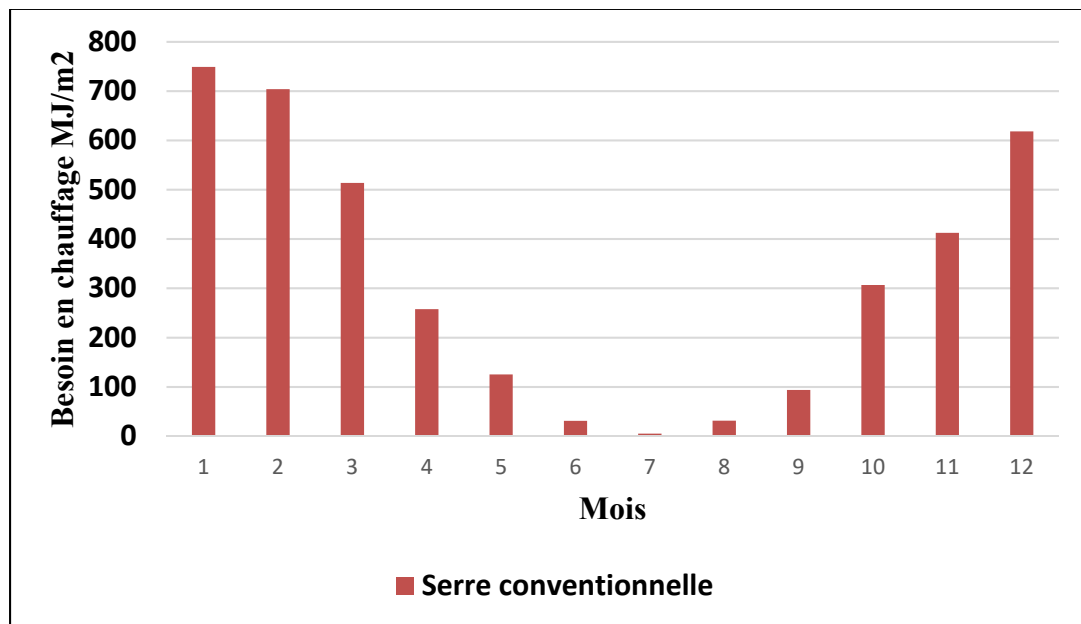


Figure 4.2: Besoin en chauffage mensuel en MJ/m²
(Serre transparente à Montréal, Culture de Tomates)

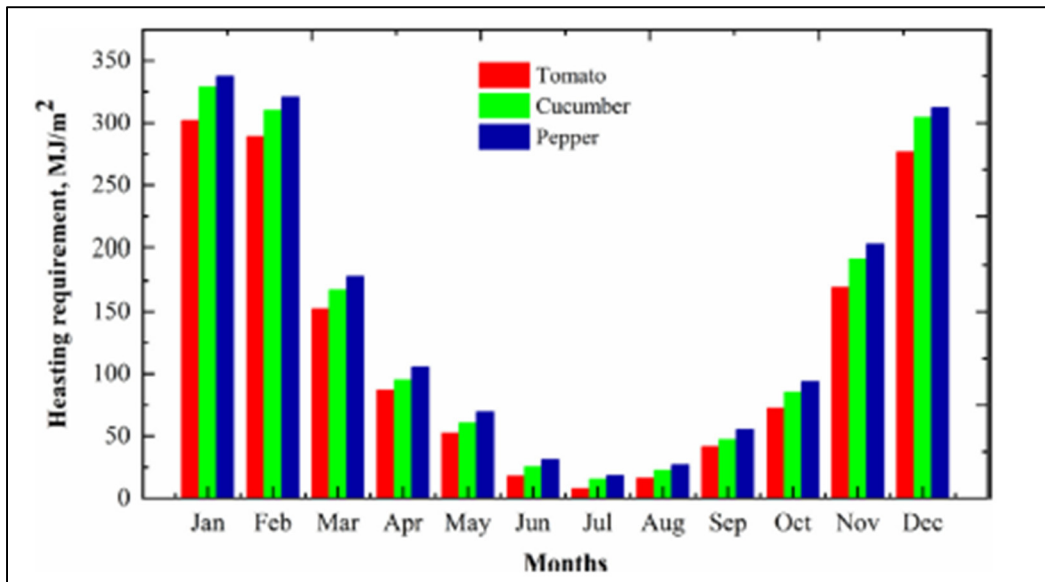


Figure 4.3: Variation annuelle des besoins en chauffage d'une serre conventionnelle à Saskatoon dédiée à la culture de tomate, concombre et poivre tiré de M.S.Ahamed (2019, p.86)

Les valeurs obtenues ne peuvent pas être comparées exactement car plusieurs paramètres thermiques interviennent dans le modèle qui ne sont pas identiques dans L'étude de référence. Plusieurs raisons ont contribué à l'obtention d'un besoin en chauffage plus grand. En effet dans l'article de référence, à part le gain de chaleur solaire et le de chaleur dissipée par le système d'éclairage, un gain de chaleur provenant des générateurs de CO₂ et d'autres moteurs assurant le control du climat à l'intérieur de la serre est pris en compte. Aussi les températures de consigne pendant la journée et le soir fixés dans le présent modèle sont différentes à celles dans l'article de référence : la température de jour et de nuit dans le présent travail sont fixés respectivement à 22 °C et 18 °C alors que pour l'article de référence, elles sont fixées à 22 °C et 16 °C. Malgré cette surestimation de la consommation d'énergie dans notre modèle il pourra nous servir à évaluer le pourcentage d'utilisation de l'énergie photovoltaïque, ce qui est le but principal de ce projet, puisqu'il reproduit bien la variation saisonnière de cette consommation.

L'allure de variation du besoin en chauffage allant d'une serre opaque à une serre transparente a été aussi validé en se basant sur une étude qui a montré que le demande d'énergie dans une serre opaque est deux fois inférieur à la serre conventionnelle (Banakar et al., 2021).

La figure 4.4 représente le besoin en chauffage mensuel en MJ/m² dans une serre conventionnelle et opaque à Montréal dédié à la culture de tomate et la figure 4.5 décrit le besoin en chauffage et refroidissement dans une serre conventionnelle et opaque. En comparant les deux allures, le besoin en chauffage d'une serre opaque est inférieur au besoin en chauffage d'une serre conventionnelle puisque l'éclairage artificiel dissipe un gain de chaleur important.

Les valeurs de consommation ne peuvent pas être également comparés puisque les paramètres thermiques, les conditions de culture ainsi que les conditions météorologiques de sont pas les mêmes.

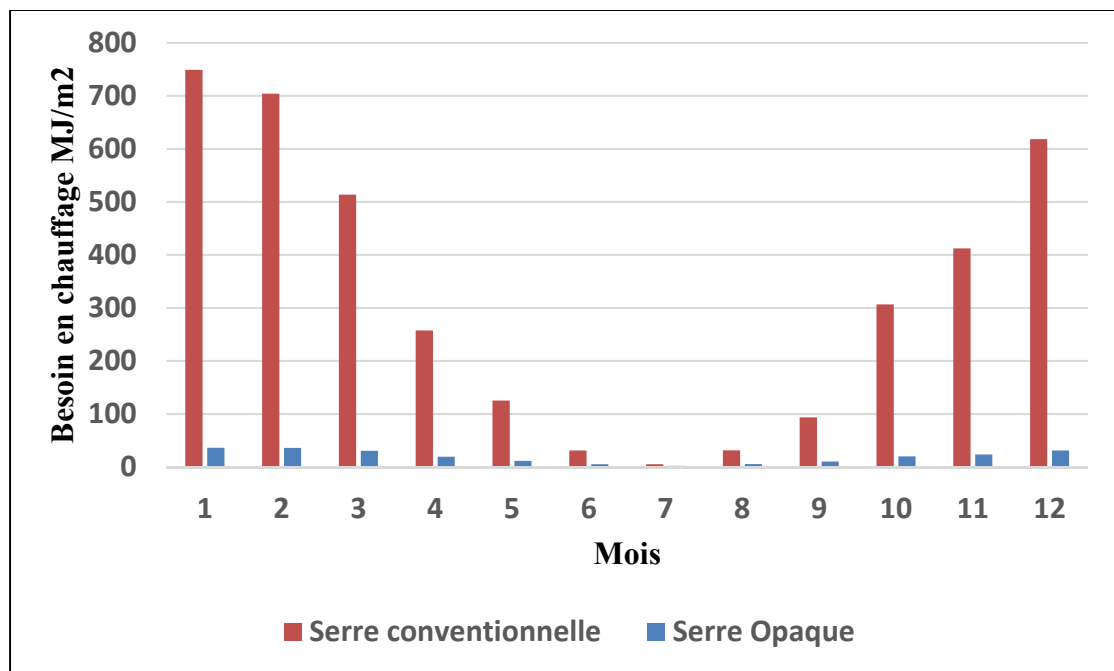


Figure 4.4: Besoin en chauffage mensuel en MJ/m²
(serre opaque et transparente et opaque à Montréal, culture des tomates)

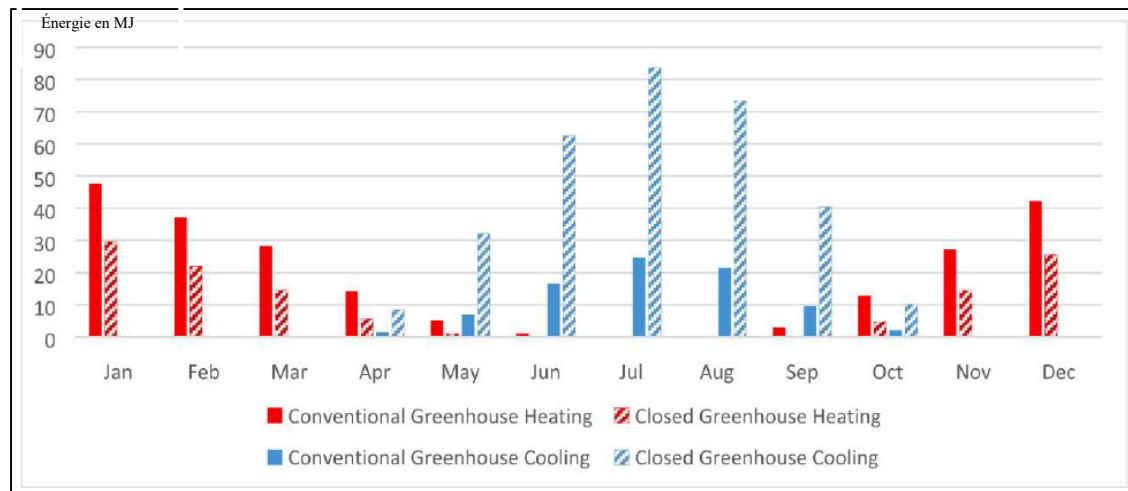


Figure 4.5: Demande mensuelle de chauffage et de refroidissement en MJ dans les serres conventionnelles et fermées de 40 m²
tiré de Banakar (2021, p.5)

Dans cette partie seulement l'allure et l'évolution des résultats ont été validés, pour avoir une validation plus exacte des valeurs obtenues, la réalisation d'un prototype aux mêmes conditions thermique, structurale et météorologique de simulation est nécessaire.

4.3 Différence de besoin en chauffage et éclairage selon la position géographique

Pour étudier l'influence du changement du lieu géographique sur le besoin en chauffage et éclairage dans les deux types de serres, la simulation 2 a été lancée.

La figure 4.6 donne le besoin en éclairage selon différentes positions géographiques : Montréal-Est, Jonquière et La Grande IV dans chaque type de serre qui font pousser la même culture sur les mêmes conditions. Pour la serre opaque, le besoin en éclairage est le même quel que soit la position géographique puisqu'il s'agit d'un éclairage artificiel alors que pour la serre transparente il y a une légère différence entre la consommation, mais reste négligeable.

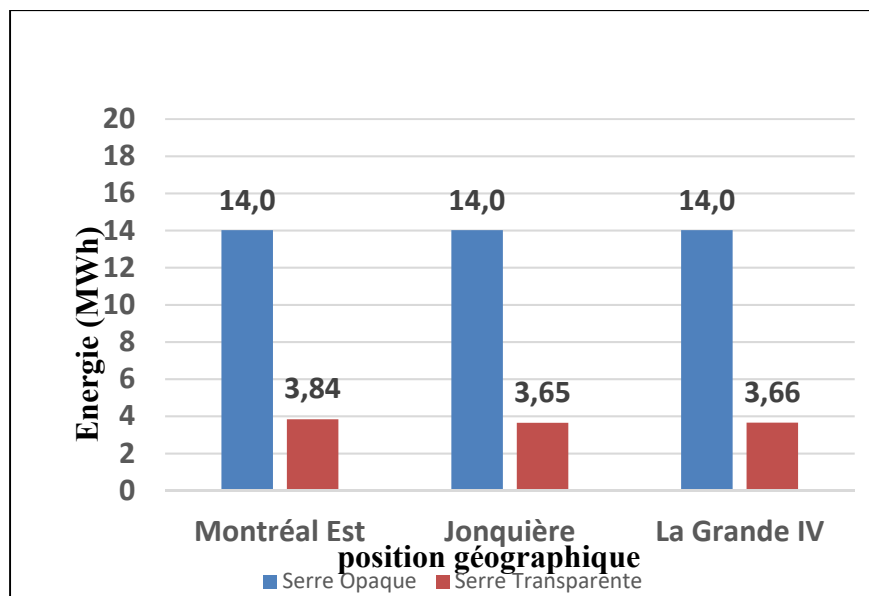


Figure 4.6 Besoins en éclairage annuel dans plusieurs emplacements (Serre opaque et transparente, culture des tomates)

La figure 4.7 décrit la variation du besoin en chauffage à la suite du changement de la position géographique dans la serre transparente et opaque. Le besoin de la serre opaque reste toujours beaucoup inférieur à celle de la serre transparente, mais pour les deux types de serre, ce besoin augmente d'une position géographique à une autre plus nordique. En effet, une serre à Montréal a un besoin en chauffage environ la moitié du besoin d'une serre à La Grande.

La différence remarquable du besoin d'énergie pour chauffer les serres dans les trois lieux influence le besoin total d'énergie par le système d'éclairage et chauffage présenté dans la figure 4.8 ce qui justifie un besoin en chauffage et éclairage total à La Grande plus grande qu'au besoin total à Jonquière qui est à son tour plus grand que le besoin à Montréal.

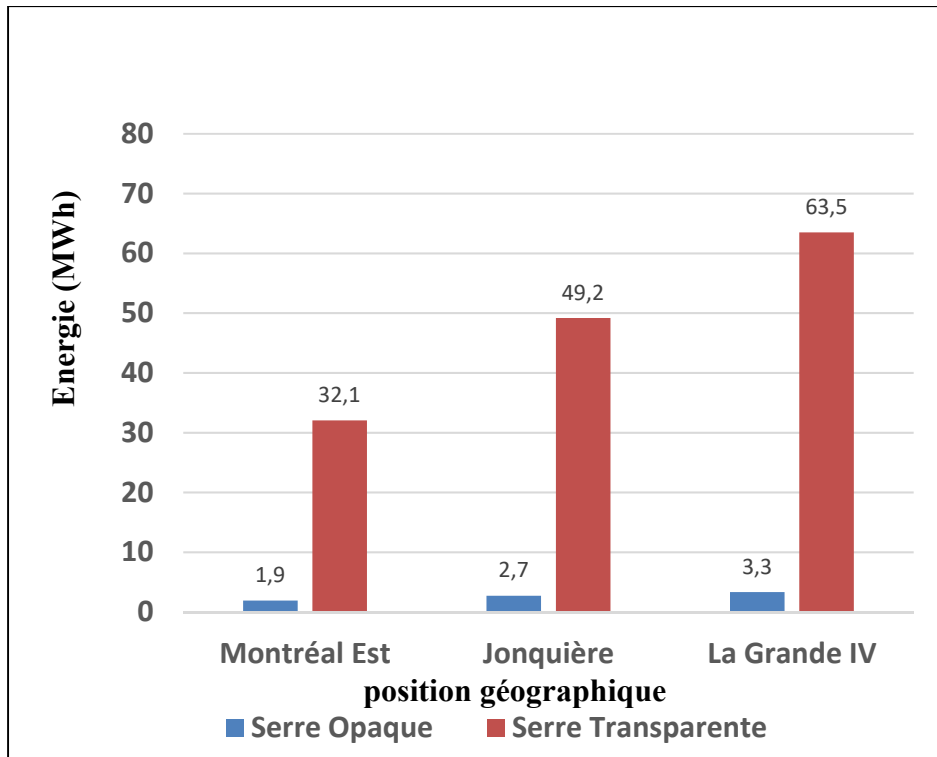


Figure 4.7 Besoin en chauffage annuel dans plusieurs emplacements (Serre opaque et transparente, culture des tomates)

La consommation d'énergie pour chauffer et éclairer la serre transparente est beaucoup plus influencée par le changement du lieu géographique par rapport à la serre opaque. En effet allant de Montréal à la Grande augmente le besoin en chauffage et éclairage de 31.3 MWh dans la serre transparente et de 1.5 MWh dans la serre opaque. Par la suite la serre opaque apparaît comme alternative qui permet de remplacer les serres conventionnelles dans les lieux nordiques pour diminuer la consommation énergétique du système de chauffage et d'éclairage. L'isolation de la serre la rend moins influencée par le climat extérieur.

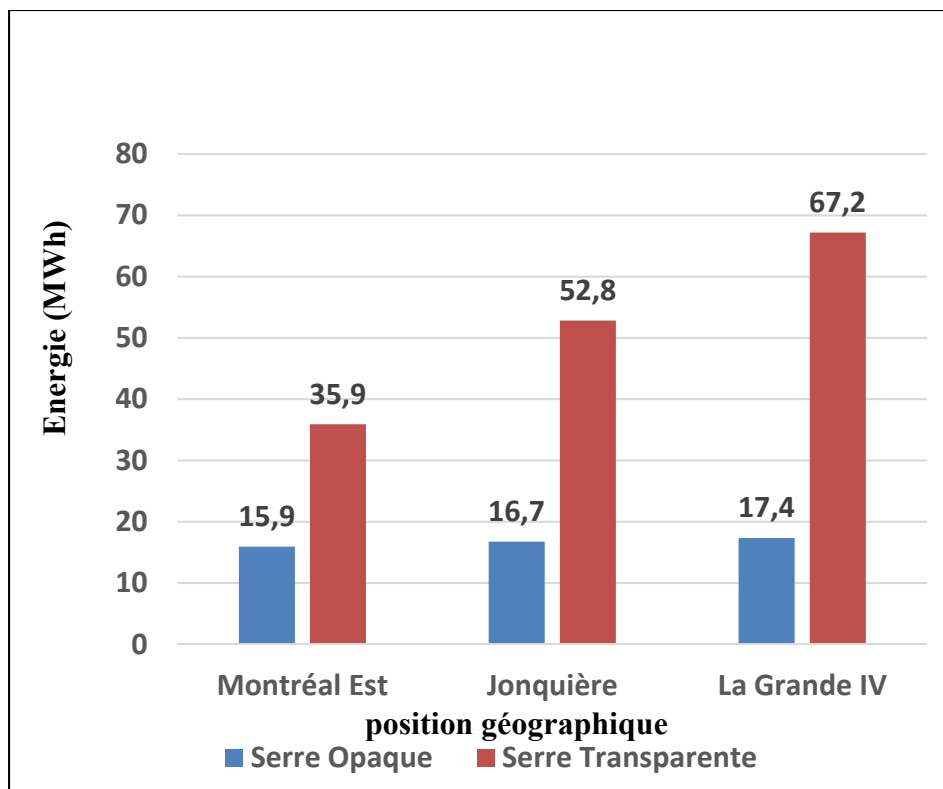


Figure 4.8 Besoin d'énergie en chauffage et éclairage annuel dans plusieurs emplacements (Serre opaque et transparente, culture des tomates)

4.4 Impact des types de cultures sur le besoin en chauffage et éclairage

Le modèle a été simulé pour deux serres : transparente et opaque à Jonquière spécialisé dans la culture des tomates et fraises (Simulation 3). La figure 4.9 présente le besoin en éclairage pour les deux types de culture. Il est remarquable que les fraises nécessitent plus d'éclairage artificiel, quel que soit le type de la serre, 25.53 MWh pour le cas d'une serre opaque et 5.88 MWh pour le cas d'une serre transparente. Ceci est justifié par un flux de photons photosynthétique demandé par les fraises plus grand ($20 \text{ mol.m}^2/\text{jour}$) que celui demandé par les tomates ($10 \text{ mol.m}^2/\text{jour}$). La serre opaque consomme toujours plus d'énergie pour l'éclairage, car elle se base sur l'éclairage artificiel seulement.

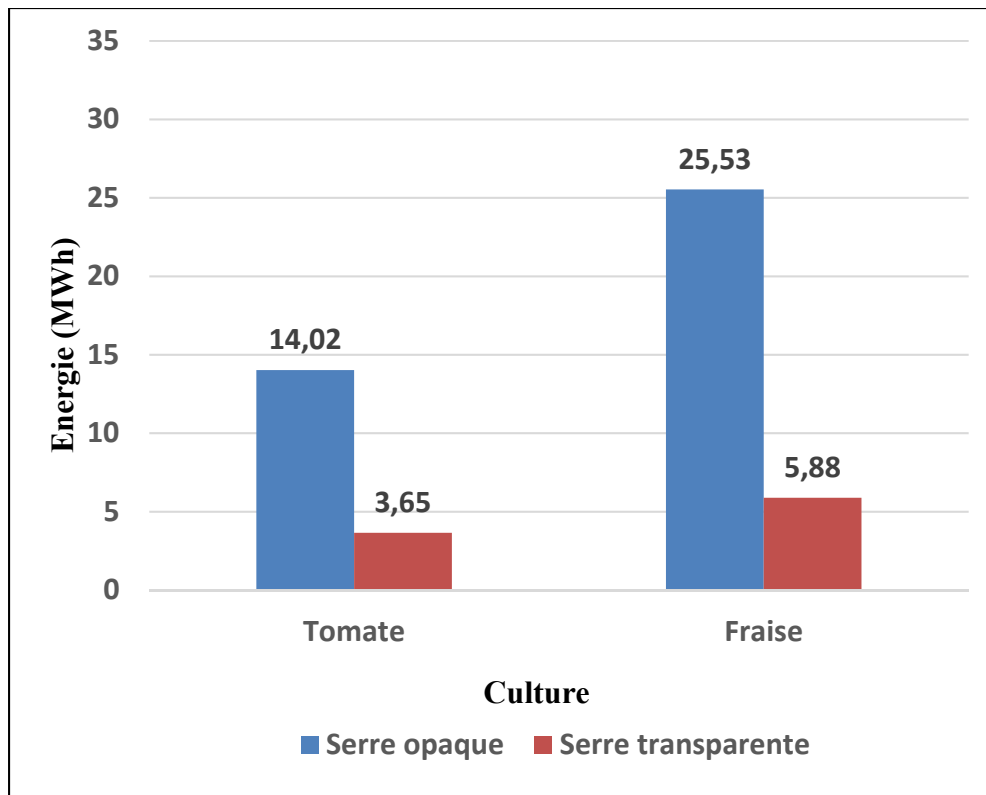


Figure 4.9 Besoin en éclairage annuel (Serre opaque et transparente à Jonquières, culture des fraises et des tomates)

Concernant le besoin en chauffage, il est décrit dans la figure 4.10 en fonction du type de culture dans la serre opaque et transparente. Le besoin en chauffage dans la serre opaque est toujours négligeable par rapport au besoin en chauffage dans la serre transparente quel que soit le type de cette culture. En effet la serre transparente consomme pour les tomates et les fraises respectivement 49.17 MWh et 33.52 MWh alors que la serre opaque consomme respectivement 2.73 MWh et 2.4 MWh.

Il est remarquable que les fraises nécessitent moins de chauffage durant l'hiver, car leur température de consigne est située entre 13°C et 18°C et elle est plus basse que la température de consigne des tomates qui est située entre 18°C et 22°C. Cette différence d'énergie est plus grande dans le cas d'une serre transparente et elle est égale à 15.65 MWh. Dans le cas d'une serre opaque la différence entre le besoin en chauffage des deux cultures est négligeable, car l'éclairage artificiel compense ce besoin.

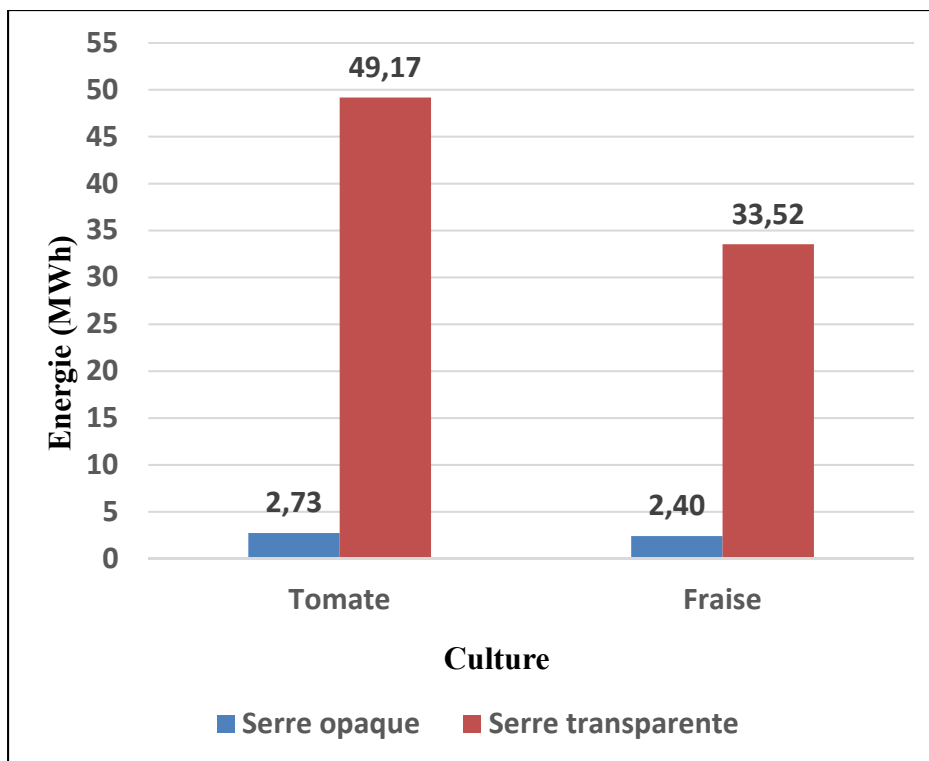


Figure 4.10 Besoin en chauffage annuel (Serre opaque et transparente à Jonquière, culture des fraises et des tomates)

Le besoin en énergie total (chauffage et éclairage) est comparé à l'aide de la figure 4.11. Pour le cas d'une serre opaque, les fraises nécessitent beaucoup plus d'énergie pour chauffer et éclairer : 27.9MWh contre 16.7MWh à cause d'une forte demande d'éclairage par rapport aux tomates. Pour une serre transparente, les tomates consomment beaucoup plus d'énergie pour chauffer et éclairer : 52.8MWh contre 39.4MWh à cause d'une forte demande de chauffage.

Dans le cas de culture des fraises, la différence de besoin en chauffage et éclairage entre la serre opaque et transparente est égale à 11.5 MWh et dans le cas de culture des tomates, cette différence est égale à 36.1 MWh. Ce qui rend la serre opaque plus attirante pour la culture des tomates que pour la culture des fraises.

La variation du flux de photons synthétique et la température de culture d'un type de plante à une autre influence la compétitivité de la serre opaque face à la serre transparente.

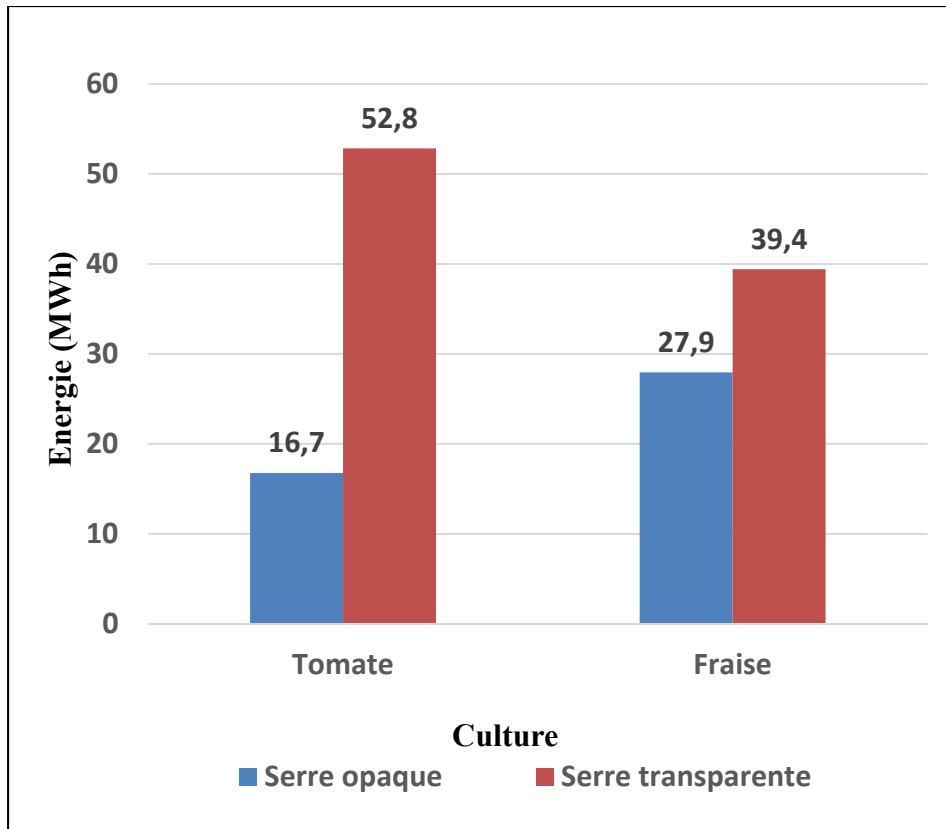


Figure 4.11 Besoin en chauffage et éclairage annuel total (Serre opaque et transparente à Jonquières, culture des fraises et des tomates)

4.5 Impact de l'ajout du PV sur la consommation d'énergie du réseau

Un système photovoltaïque directement couplé est intégré dans la serre opaque et transparente qui font pousser les tomates à Jonquières. Pour bien juger l'intégration du système photovoltaïque, la simulation 4 a été lancée premièrement pour un système photovoltaïque alimentant l'éclairage, deuxièmement pour un système photovoltaïque alimentant le chauffage et troisièmement pour un système photovoltaïque alimentant le chauffage et l'éclairage ensemble.

4.5.1 Impact de l'ajout du système photovoltaïque alimentant le système d'éclairage sur la consommation de l'énergie du réseau

La figure 4.12 et 4.13 montrent la puissance photovoltaïque produite et la puissance consommée respectivement pour une serre opaque et transparente en variant le nombre de panneaux installés. Le nombre de panneaux élevé dans le cas d'une serre opaque par rapport à la serre transparente s'explique par une consommation d'éclairage plus élevée dans la serre opaque.

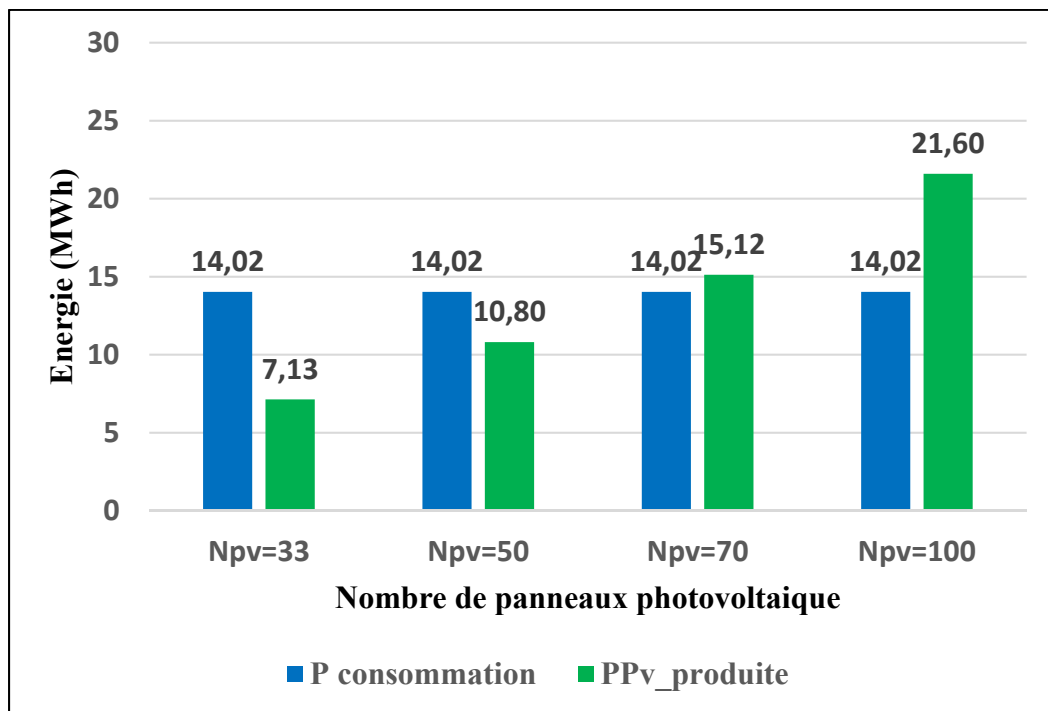


Figure 4.12 Consommation d'éclairage et énergie photovoltaïque produite annuelles par panneaux installés (serre opaque à Jonquière, culture des tomates)

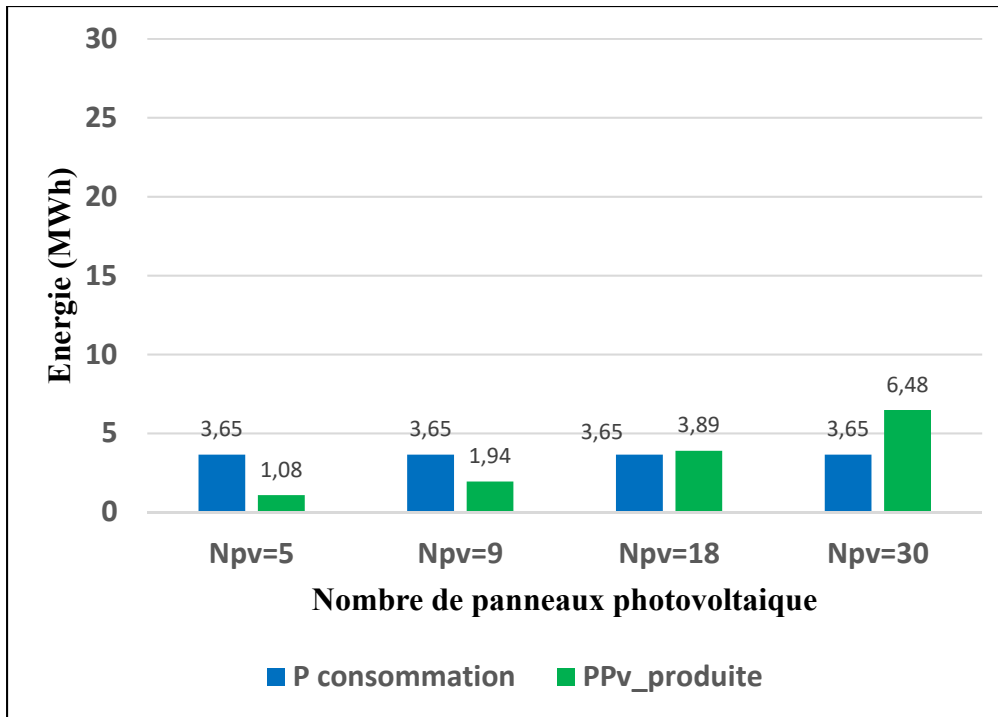


Figure 4.13 Consommation d'éclairage et énergie photovoltaïque produite annuelles par panneaux installés (serre transparente à Jonquières, culture des tomates)

Les figures 4.14 et 4.15 représentent le pourcentage de l'énergie tirée par le réseau (% Réseau) et par les panneaux photovoltaïques (% PV utilisé) pour satisfaire le besoin d'éclairage et le taux d'utilisation de la puissance photovoltaïque pour différente puissance photovoltaïque installée (Taux d'utilisation PV). Le taux d'utilisation PV représente la puissance photovoltaïque produite qui est utilisée pour alimenter le système d'éclairage.

La figure 4.14 traite le cas d'une serre opaque, plus que la puissance photovoltaïque installée augmente plus la puissance photovoltaïque alimentant le système d'éclairage augmente et au contraire la puissance tirée du réseau diminue. En revanche, le taux d'utilisation PV diminue, car la puissance photovoltaïque produite augmente et dépasse l'énergie demandée par le système d'éclairage. La puissance tirée du réseau ne s'annule pas dans ces conditions de culture, quelle que soit la puissance photovoltaïque installée, car le système d'éclairage est

allumé pendant une période de 5h à 17h où le système photovoltaïque ne produit pas toujours de la puissance.

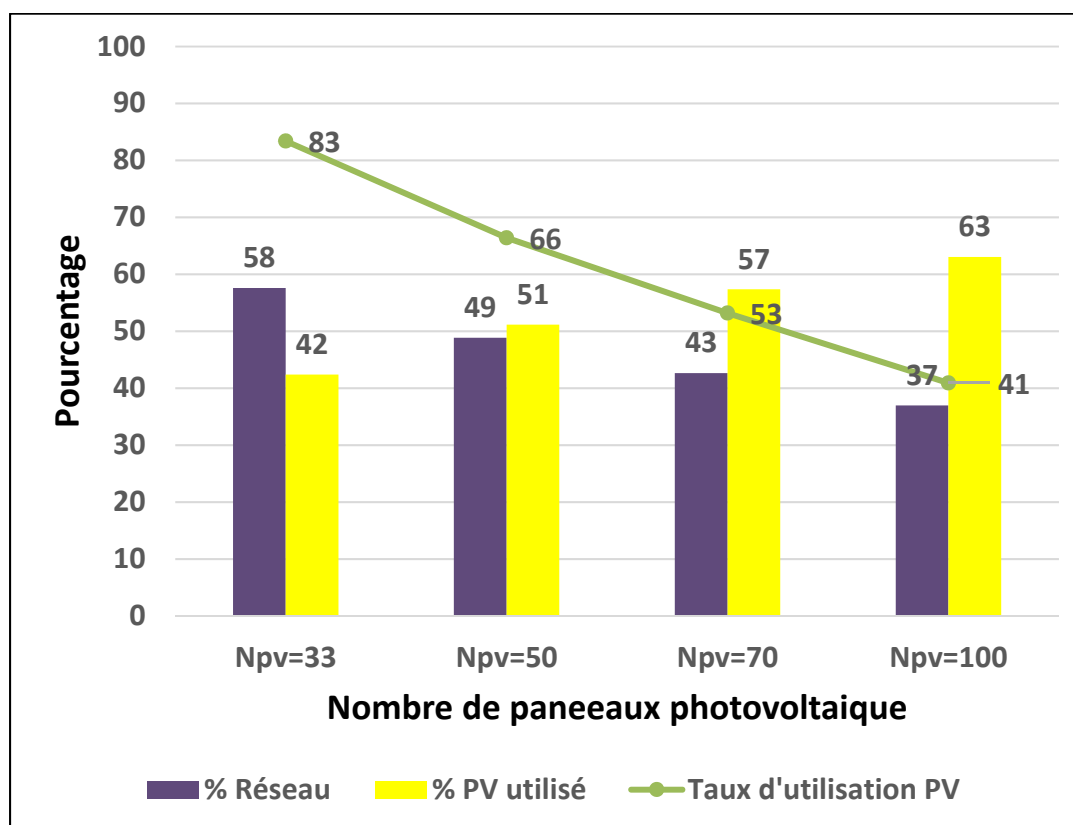


Figure 4.14 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre opaque à Jonquière, culture des tomates, éclairage)

Un nombre de panneaux égal à 33 est avantageux par rapport aux autres de point de vue utilisation de la puissance photovoltaïque produite. En effet il permet d'utiliser 83 % de l'énergie photovoltaïque produite. Et un nombre de panneaux égal à 100 est avantageux par rapport aux autres de point de vue satisfaction de la demande d'énergie du système d'éclairage en assurant 63 % de la consommation.

Par la suite, le choix du nombre de panneau à installer se base sur deux critères : le premier critère est l'utilisation maximale de la puissance photovoltaïque produite, quel que soit son pourcentage par rapport à la demande et le deuxième critère soit l'utilisation maximale de l'énergie photovoltaïque satisfaisant le besoin du système d'éclairage. Le deuxième critère

devient plus intéressant si un système de stockage est ajouté pour éviter le gaspillage. Pour 70 capteurs, il y a synchronisme entre le % de l'éclairage qui vient du solaire et le taux d'utilisation de l'énergie solaire produite. En augmentant à 100 capteurs, le % de l'éclairage qui vient du réseau s'approche du taux d'utilisation de l'énergie solaire.

La figure 4.15 traite le cas d'une serre transparente, les indices %PV utilisé et taux d'utilisation PV sont presque nulle. Ceci se traduit par le fait que la serre transparente se base sur l'éclairage naturel durant la journée et sur l'énergie du réseau durant le soir et l'énergie photovoltaïque produite est non utilisée.

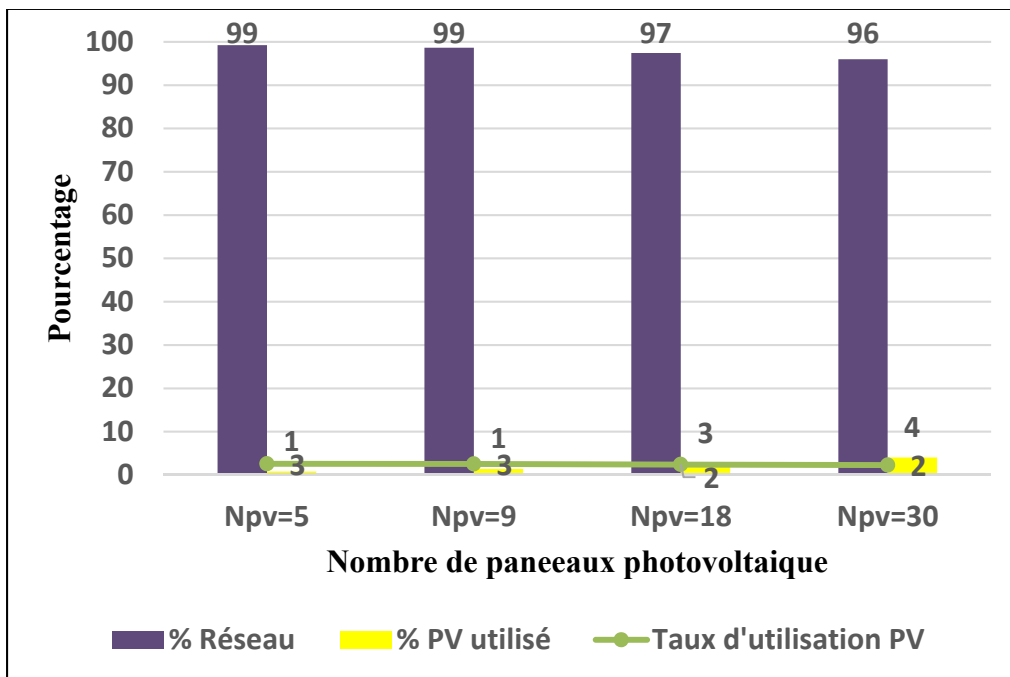


Figure 4.15 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre transparente à Jonquières, culture des tomates, éclairage)

L'intégration du système photovoltaïque pour alimenter le système d'éclairage dans une serre transparente est un gaspillage et n'est pas une solution intéressante contrairement à la serre opaque.

4.5.2 Impact de l'ajout du système photovoltaïque alimentant le système de chauffage sur la consommation de l'énergie du réseau

La figure 4.16 et 4.17 montrent la puissance photovoltaïque produite ainsi que la puissance consommée en variant le nombre de panneaux installés pour alimenter le chauffage respectivement pour une serre opaque et une serre transparente. Le nombre de panneaux élevé dans le cas d'une serre transparente par rapport à la serre opaque s'explique par une consommation de chauffage plus élevée dans la serre transparente. En effet, la serre opaque a besoin de 14 panneaux pour satisfaire le besoin en chauffage alors que la serre transparente a besoin de 250 panneaux.

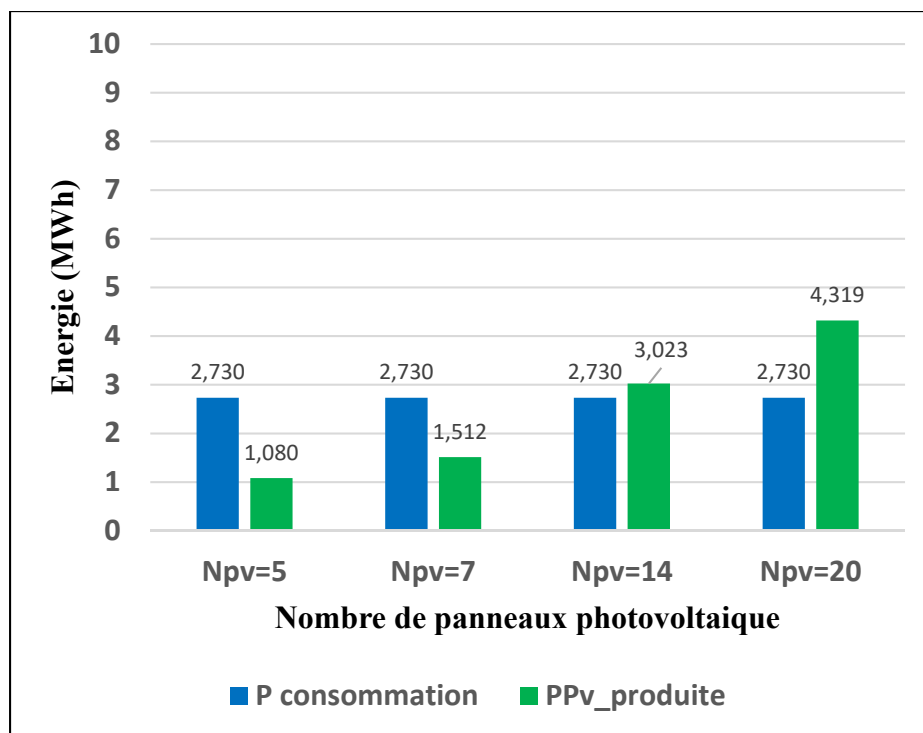


Figure 4.16 Consommation du chauffage et énergie photovoltaïque produite annuelle par panneaux installés (serre opaque à Jonquière, culture des tomates)

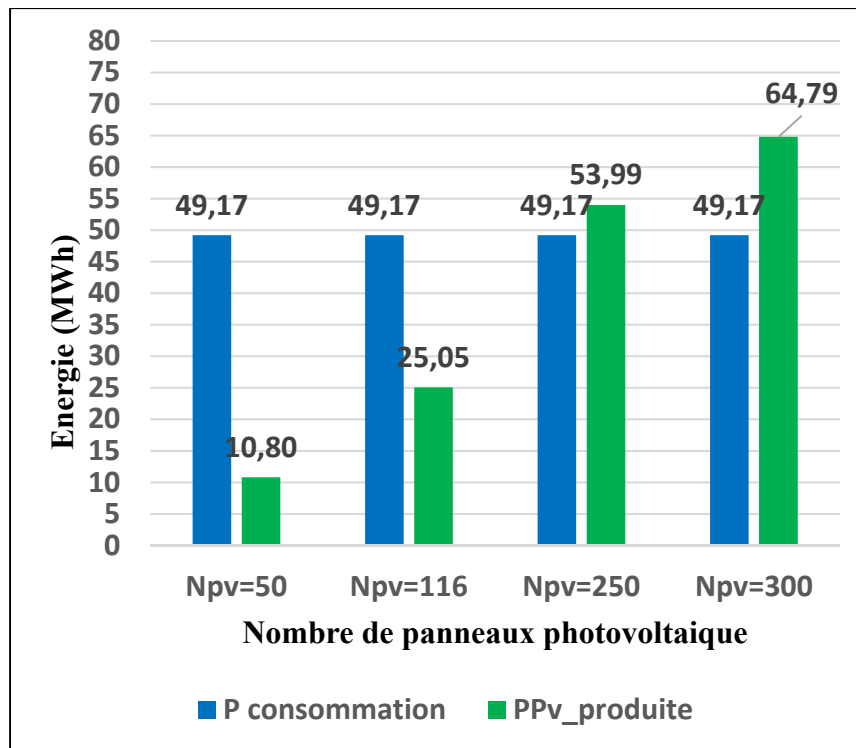


Figure 4.17 Consommation du chauffage et énergie photovoltaïque produite annuelle par panneaux installés (serre transparente à Jonquières, culture des tomates)

D'après la figure 4.18 qui décrit le pourcentage de puissance tirée du réseau, le pourcentage de puissance tirée du système photovoltaïque et le taux d'utilisation de la puissance photovoltaïque pour la serre opaque, la majorité de l'énergie consommée par le chauffage est tirée du réseau et l'énergie photovoltaïque intervient avec un pourcentage négligeable. En effet pendant la journée qui correspond à la période de photosynthèse, l'éclairage artificiel est allumé ce qui rétrécit le besoin en chauffage. Par la suite, l'énergie tirée du système photovoltaïque devient très faible par rapport à l'énergie produite. Pendant le soir, durant lequel la demande de chauffage augmente, car l'éclairage est éteint, le système photovoltaïque ne produit pas de l'énergie donc le chauffage est assuré par le réseau seulement.

L'intégration du système photovoltaïque dans la serre opaque pour alimenter le chauffage n'est pas une solution attirante à moins que la photopériode soit fixée durant la nuit pour profiter de l'énergie photovoltaïque produite durant la journée.

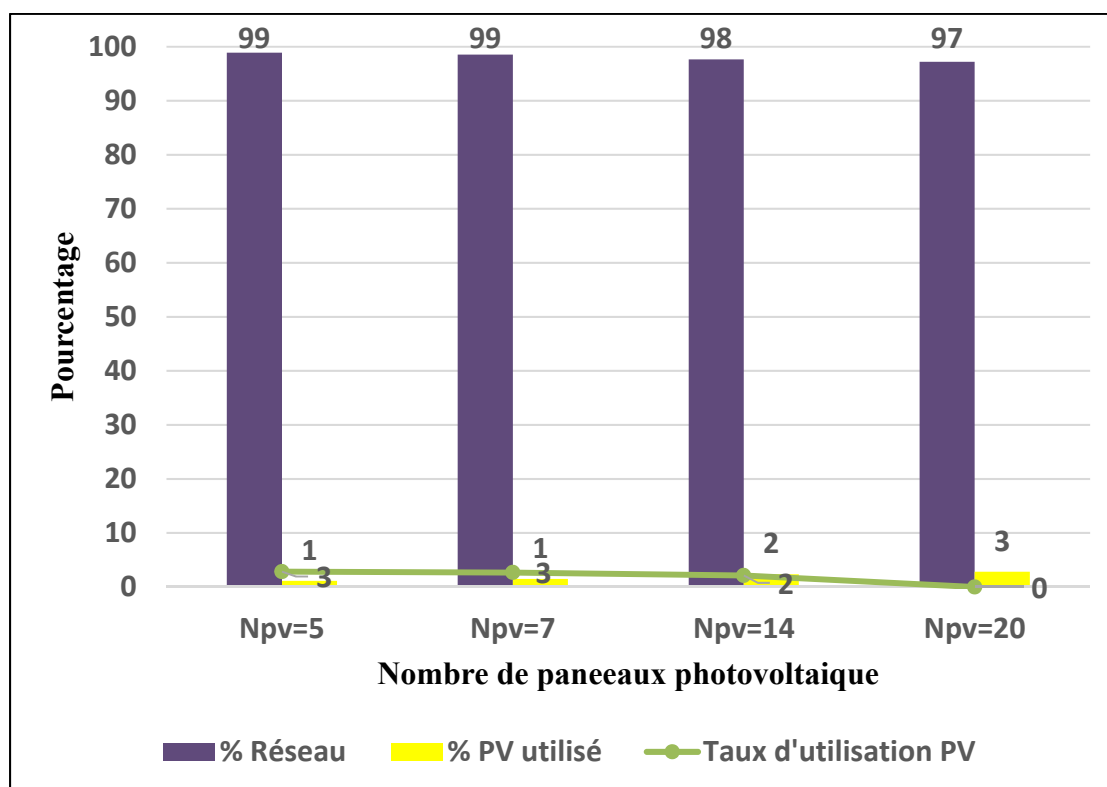


Figure 4.18 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre opaque à Jonquières, culture des tomates, chauffage)

La figure 4.19 présente les mêmes indices que la figure 4.18, mais pour le cas d'une serre transparente. D'après les données sur cette figure, le réseau intervient avec un grand pourcentage pour alimenter le chauffage. En réalité, la serre transparente a besoin de moins de chauffage pendant la journée que pendant la nuit grâce aux rayonnements solaires absorbés. Donc l'énergie photovoltaïque produite durant la journée n'est pas trop utilisée ce qui explique le faible taux d'utilisation. L'augmentation de la demande de chauffage pendant la nuit durant laquelle la production photovoltaïque est nulle et la disponibilité de l'éclairage

naturel pendant la journée justifie le grand écart entre le pourcentage de l'énergie tirée du réseau et le pourcentage tiré du système photovoltaïque.

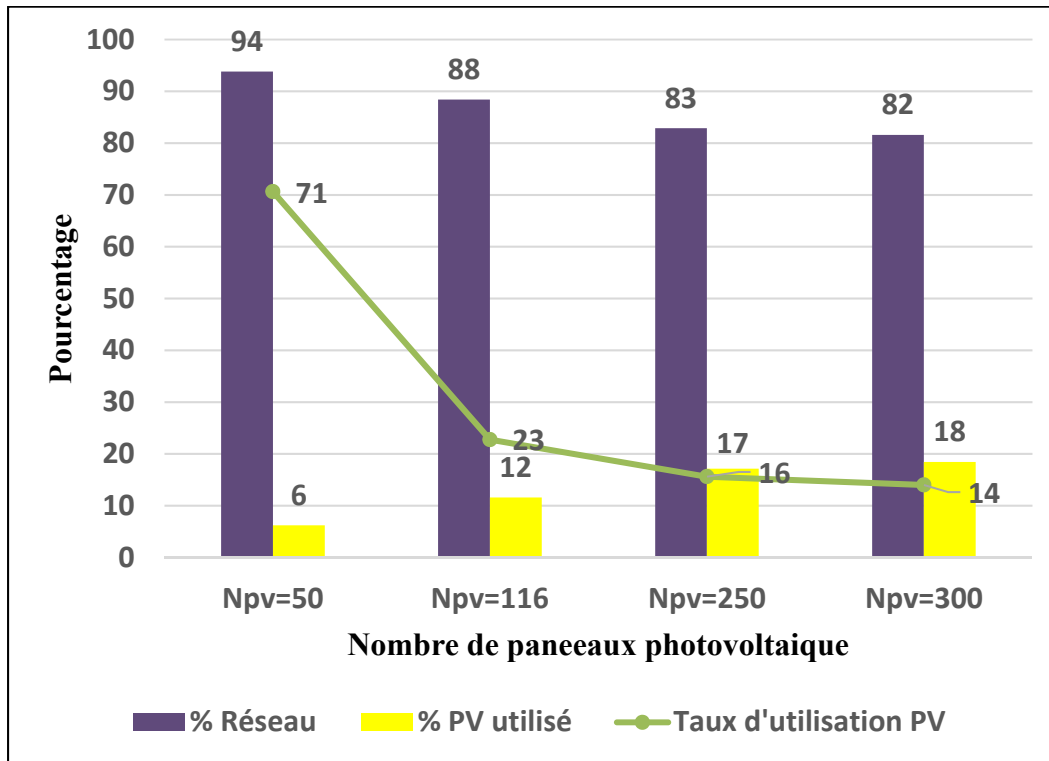


Figure 4.19 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre transparente à Jonquière, culture des tomates, chauffage)

Une comparaison entre les figures 4.18 et 4.19 montre que la puissance photovoltaïque est beaucoup plus utilisée et intervient plus dans l'alimentation du système de chauffage dans le cas d'une serre transparente que dans le cas d'une serre opaque. Ceci est justifié par le fait que l'éclairage artificiel durant la photosynthèse comble tout le besoin en chauffage dans la serre opaque, cependant pour la serre transparente la chaleur venant des radiations solaires est insuffisante pour satisfaire le besoin en chauffage.

Par la suite, la solution d'intégrer un système photovoltaïque pour alimenter le chauffage est plus attirante pour la serre transparente que pour la serre opaque. Malgré cela, le taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque dans la serre transparente reste faible.

4.5.3 Impact de l'ajout du système photovoltaïque alimentant le système d'éclairage et chauffage sur la consommation de l'énergie du réseau

Dans cette partie, le système photovoltaïque a été intégré pour alimenter le système de chauffage et éclairage simultanément. La consommation et l'énergie photovoltaïque produite en fonction de la puissance photovoltaïque installée sont présentées dans les figures 4.20 et 4.21 respectivement pour une serre opaque et une serre transparente. Le nombre de panneaux élevé dans le cas de la serre transparente est toujours justifié par une consommation plus élevée dans cette dernière. La serre transparente a besoin d'un nombre de panneaux égal à 250 et la serre opaque a besoin de 80 panneaux pour satisfaire le besoin en chauffage et éclairage.

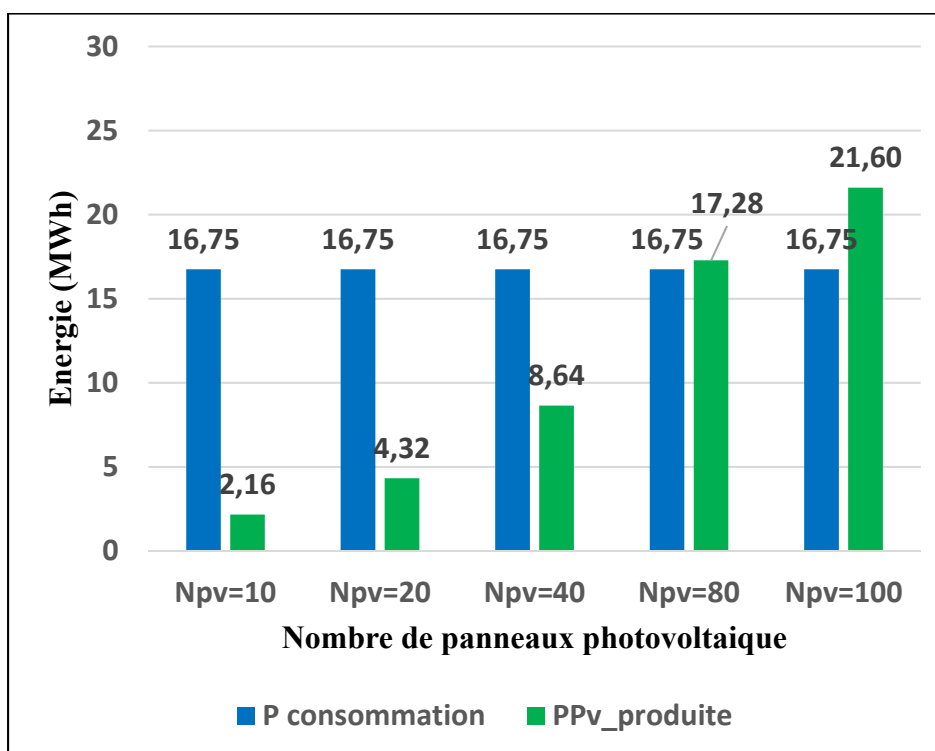


Figure 4.20 Consommation totale et énergie photovoltaïque produite annuelle par panneaux installés (serre opaque à Jonquière, culture des tomates)

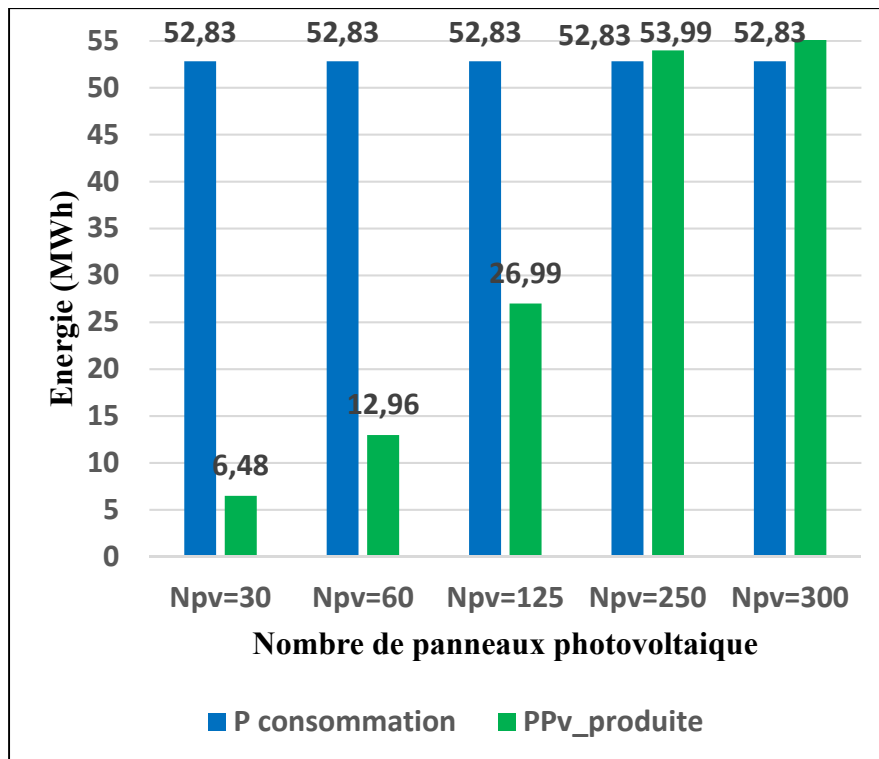


Figure 4.21 Consommation totale et énergie photovoltaïque produite annuelle par panneaux installés (serre transparente à Jonquières, culture des tomates)

Les figures 4.22 et 4.23 affichent le pourcentage de puissance tirée du réseau, pourcentage de puissance tirée du système photovoltaïque et le taux d'utilisation de la puissance photovoltaïque respectivement pour la serre opaque et la serre transparente.

L'intégration du système photovoltaïque dans la serre opaque pour alimenter le système d'éclairage a montré un grand potentiel tandis que pour alimenter le système de chauffage elle n'est pas privilégiée. Par la suite, le couplage des deux systèmes photovoltaïques pour alimenter le chauffage et l'éclairage dans la serre opaque a diminué le taux d'utilisation de la puissance photovoltaïque utilisée, l'énergie tirée du système photovoltaïque et a augmenté l'énergie tirée du réseau comme montré dans la figure 4.22. En effet, pour un nombre de panneaux égal à 80 qui produit la quantité d'énergie demandé par les systèmes de chauffage et éclairage, le taux d'utilisation à tomber à 49 % comparé à 53 % pour un nombre de panneaux égaux à 70 produisant la quantité d'énergie demandée par le système d'éclairage.

Aussi, pour un même nombre de panneaux installés qui vaut 100, un taux d'utilisation atteint le 41 %, le pourcentage de la puissance tiré des panneaux photovoltaïques est égale à 63 % et le pourcentage de la puissance tirée du réseau correspond à 37 % dans le cas d'un système photovoltaïque alimentant le système d'éclairage seul, mais pour le cas d'un système photovoltaïque alimentant le système d'éclairage et de chauffage, le taux d'utilisation équivalent à 42 %, le pourcentage de la puissance tiré des panneaux photovoltaïques est égale à 54 % et le pourcentage de la puissance tirée du réseau correspond à 46%.

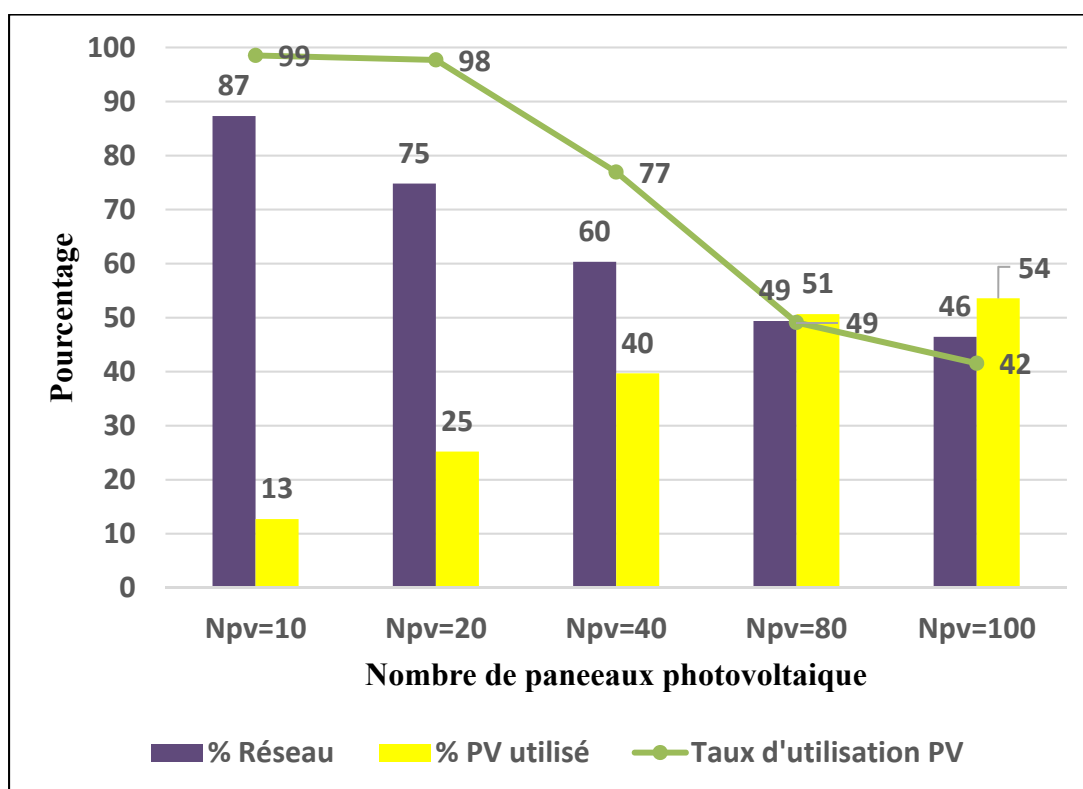


Figure 4.22 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre opaque à Jonquière, culture des tomates, chauffage et éclairage)

Fusionner les deux systèmes photovoltaïques pour avoir un seul alimentant l'éclairage et le chauffage est une solution inutile et déconseillée puisque d'une part le chauffage est toujours alimenté par le réseau avec un pourcentage supérieur à 87 % et d'autre part elle fait diminuer le taux d'utilisation de la puissance photovoltaïque, le pourcentage de l'énergie

photovoltaïque alimentant l'éclairage et le chauffage et fait augmenter le pourcentage de l'énergie tirée du réseau.

Le système photovoltaïque dans la serre transparente a eu une capacité pour alimenter le système de chauffage ce qui n'était pas le cas pour alimenter le système d'éclairage. D'après la figure 4.23, un nombre de panneaux égal à 250 délivrant la puissance demandée permet d'avoir un taux d'utilisation égale à 16 %, un pourcentage de puissance photovoltaïque qui vaut 16 % et une énergie tirée de réseau correspond à 84 %. Ces valeurs ne changent pas pour un nombre de panneaux égal à 250 délivrant une puissance égale à la consommation du système de chauffage.

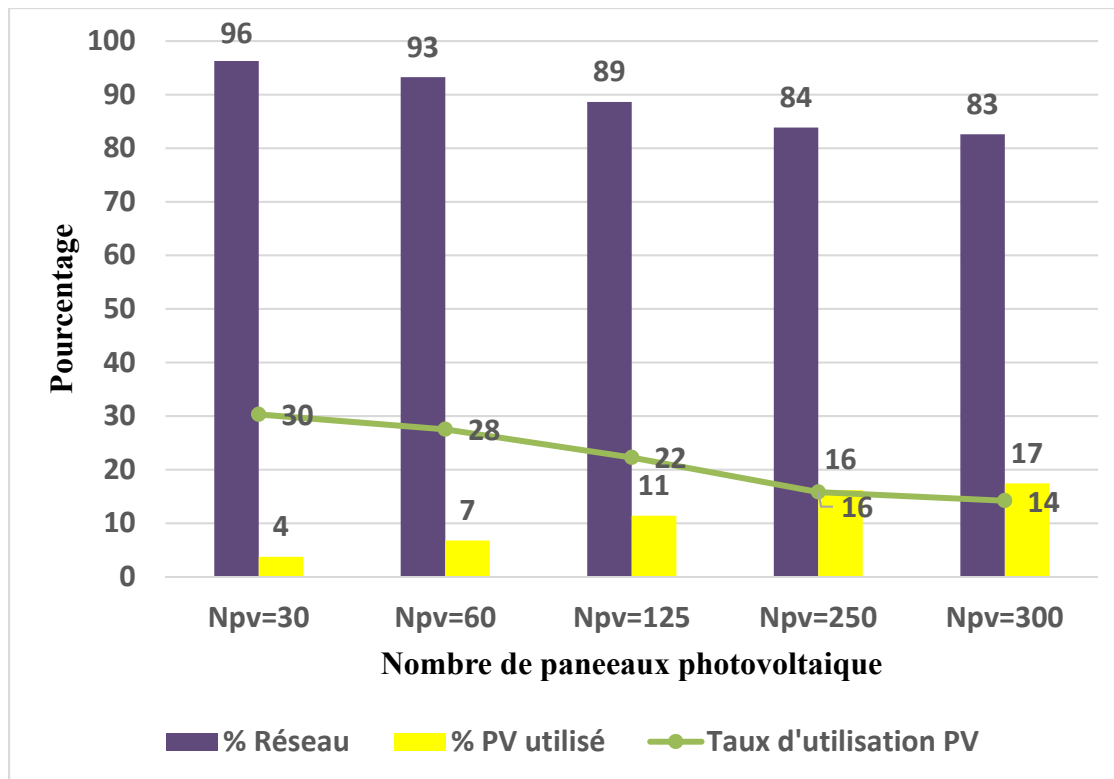


Figure 4.23 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel (serre transparente à Jonquières, culture des tomates, chauffage et éclairage)

Par la suite, choisir un système photovoltaïque alimentant le système de chauffage seulement n'influence pas le taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque, le pourcentage de la puissance photovoltaïque alimentant le chauffage et le système d'éclairage.

4.6 Impact du nombre de plateaux de cultures dans le même volume de serre sur le besoin en chauffage et éclairage

Cette partie est consacrée aux serres opaques dans lesquelles plusieurs étages de culture sont cultivés en même temps. La simulation 5 a été exécutée pour étudier l'impact du changement du nombre de plateaux de cultures dans le même volume de serre sur le besoin en chauffage et éclairage de la serre. Non seulement le nombre d'étages a été varié, mais aussi la photopériode. La puissance d'éclairage permet d'atteindre le même DLI pour chaque niveau et chaque photopériode. Trois plages horaires de photosynthèse ont été employées comme indiqué dans le tableau 4.1:

Tableau 4.1 Scénarios de photopériode possible dans une serre opaque à un, deux ou trois étages de culture

Scénarios	Photopériode		
	Minuit – huit heures	Huit– seize heures	Seize heures - minuit
S1	Un, deux ou trois étages de culture		
S2		Un, deux ou trois étages de culture	
S3			Un, deux ou trois étages de culture

Les figures 4.24, 4.25 et 4.26 décrivent le besoin en chauffage et éclairage et le besoin total en fonction du nombre d'étages respectivement pour un scénario de photopériode S1, S2 et S3.

D'après les données affichées, quelle que soit la photopériode, le besoin en chauffage et éclairage augmente avec l'augmentation du nombre d'étages dans la serre et la consommation d'énergie du système d'éclairage est toujours nettement plus grande que la

consommation d'énergie pour le chauffage. Il est clair aussi que le changement de la photopériode n'influence pas l'énergie consommée par les lampes puisque l'éclairage employé est artificiel.

Il est remarqué que le changement du nombre d'étages pour la même photopériode n'entraîne pas la variation du besoin en chauffage. Par exemple pour un scénario de photopériode S1 le besoin en chauffage est égal à 2.2 MWh pour un étage, deux étages et trois étages. Ceci est expliqué par le volume inchangé de la serre et le fonctionnement simultané de tous les étages, les lampes allumées compensent tout le besoin en chauffage durant la photopériode et la quantité d'énergie demandée par le chauffage qui s'affiche dans les figures correspond réellement au besoin du chauffage hors la photopériode. En revanche, le changement de la photopériode change le besoin en chauffage. En effet la même serre a un besoin en chauffage égale à 2.2 MWh pour une photosynthèse active pendant S1, 2.39 MWh pour une photosynthèse active pendant S2 et 2.36 MWh pour une photopériode active pendant S3.

En comparant le besoin en éclairage et chauffage en total, la même serre fonctionnant pendant S1 a besoin de moins d'énergie pour chauffer et éclairer les trois niveaux en comparant avec les autres photopériodes. Ceci permet de déduire qu'une serre opaque composée de plusieurs étages qui fonctionnent en même temps a un besoin en énergie pour chauffer et éclairer qui augmente avec l'augmentation du nombre d'étages et le changement de photopériode permet d'avoir un gain énergétique, mais il est négligeable.

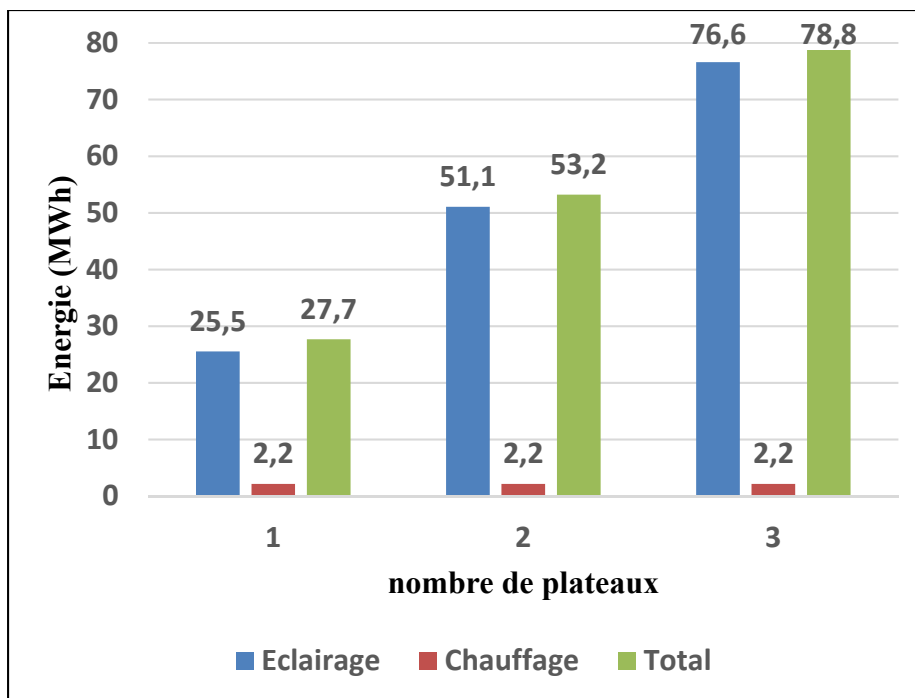


Figure 4.24 Besoin en éclairage et chauffage annuel par étage de culture (Serre opaque à Jonquière, culture des fraises, Scénario S1)

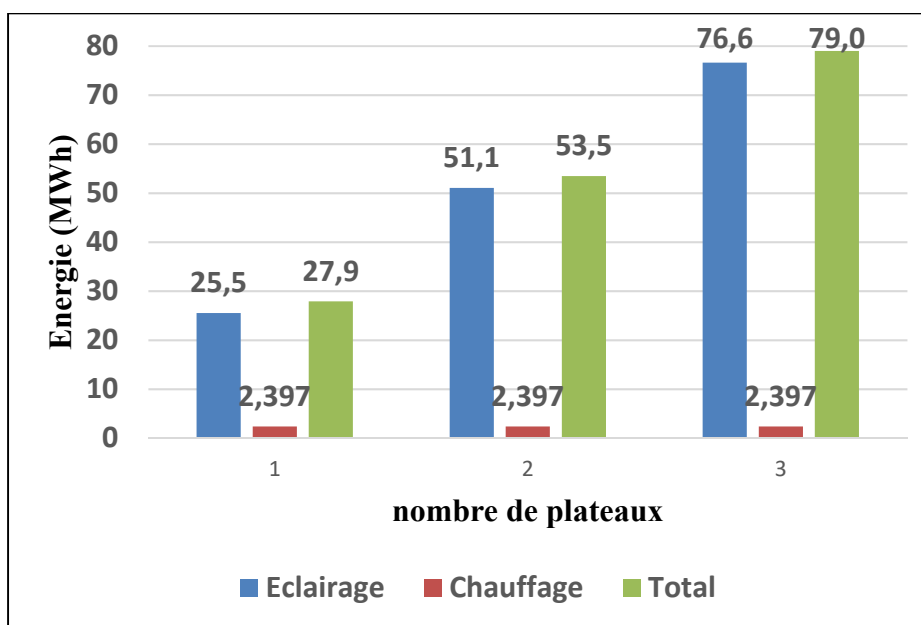


Figure 4.25 Besoin en éclairage et chauffage annuel par étage de culture (Serre opaque à Jonquière, culture des fraises, Scénario S2)

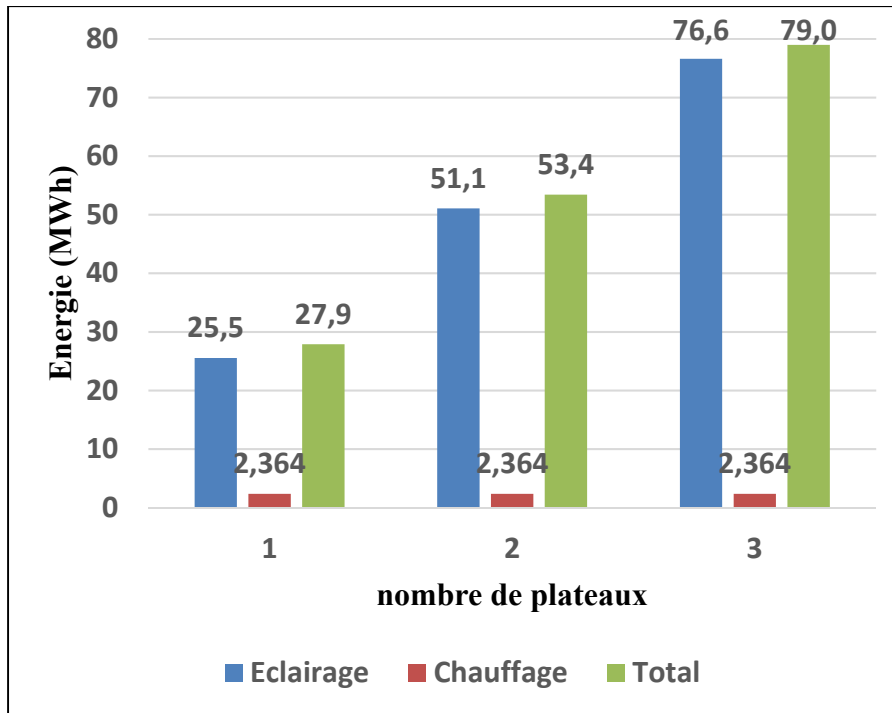


Figure 4.26 Besoin en éclairage et chauffage annuel par étage de culture (Serre opaque à Jonquières, culture des fraises, Scénario S3)

4.7 Impact de l'alternance de l'éclairage entre les étages de cultures sur le besoin en chauffage et éclairage

Après avoir étudié l'influence de l'augmentation du nombre d'étages de culture fonctionnant dans une même serre durant la même photopériode, une alternance de l'éclairage entre les étages est appliquée pour étudier son impact sur le besoin en éclairage et chauffage. La simulation 6 est alors lancée et l'alternance a été appliquée sur deux et trois niveaux de cultures.

Les scénarios d'éclairage utilisés sont regroupés dans le tableau 4.2 pour une serre à deux étages et dans le tableau 4.3 pour une serre à trois étages de culture.

Cette simulation permet de déterminer la photopériode optimale qui permet d'avoir le moindre besoin en chauffage et éclairage.

Tableau 4.2 Scénarios de photopériode possible dans une serre opaque à deux étages de culture

Scénarios	Photopériode		
	Minuit – huit heures	Huit– seize heures	Seize heures - minuit
S1		1 niveau de culture	1 niveau de culture
S2	1 niveau de culture		1 niveau de culture
S3	1 niveau de culture	1 niveau de culture	
S4	2 niveaux de culture		
S5		2 niveaux de culture	
S6			2 niveaux de culture

Tableau 4.3 Scénarios de photopériode possible dans une serre opaque à trois étages de culture

Scénarios	Photopériode		
	Minuit – huit heures	Huit– seize heures	Seize heures - minuit
S1	1 niveau de culture	1 niveau de culture	1 niveau de culture
S2		2 niveaux de culture	1 niveau de culture
S3		1 niveau de culture	2 niveaux de culture
S4	2 niveaux de culture	1 niveau de culture	
S5	1 niveau de culture	2 niveaux de culture	
S6	2 niveaux de culture		1 niveau de culture
S7	1 niveau de culture		2 niveaux de culture
S8	3 niveaux de culture		
S9		3 niveaux de culture	
S10			3 niveaux de culture

La figure 4.27 décrit le besoin en éclairage et chauffage en fonction des scénarios de photopériode pour une serre opaque à deux niveaux. Le besoin du système d'éclairage est constant, quelle que soit la photopériode puisque l'éclairage de toute la serre est artificiel. Ce qui fait la différence est au niveau du besoin en chauffage.

Les scénario S2 permettent d'avoir le moindre besoin en chauffage.

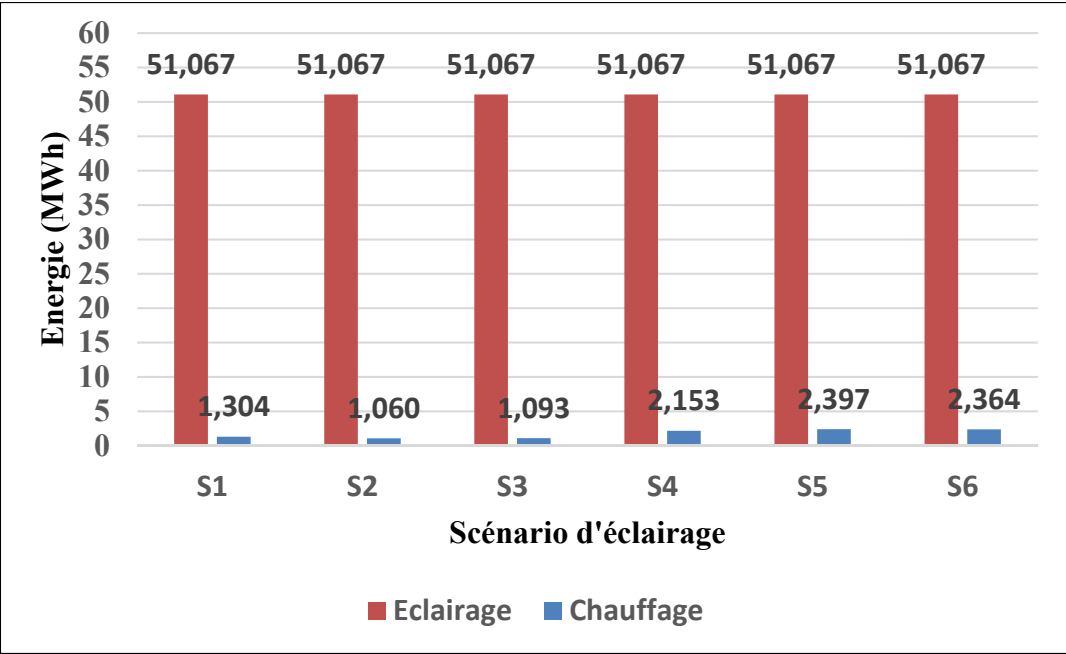


Figure 4.27 Besoin en éclairage, chauffage annuel par scénario d'éclairage (serre opaque à Jonquières, deux niveaux de culture des fraises)

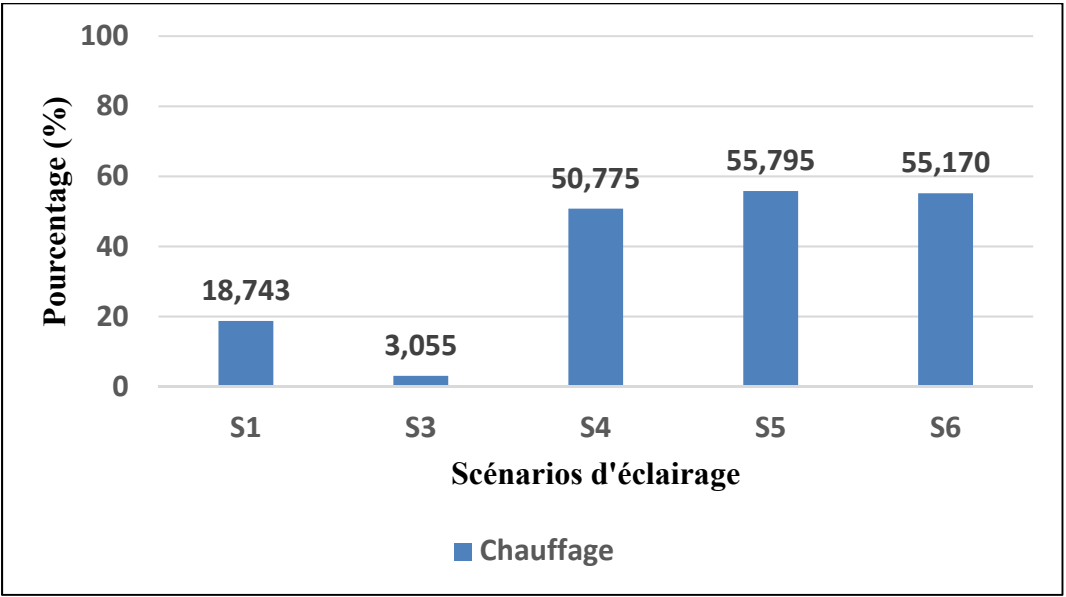


Figure 4.28 Besoin en chauffage annuel économisé par scénario d'éclairage (Serre opaque à Jonquières, deux niveaux de culture des fraises)

La figure 4.28 représente le pourcentage le besoin en chauffage économisée en comparaison au scénario S2 pour les scénarios plus énergivores. Par exemple allumer l'utilisation de l'éclairage dans scénario S2 au lieu de S5 permet d'économiser 55.7 % de l'énergie consommée par le système de chauffage. Le scénario le plus compétitif au scénario S2 est S3, en effet seulement 3 % du besoin en chauffage est économisée.

La figure 4.29 décrit le besoin en chauffage et éclairage en fonction des scénarios de photopériode pour une serre opaque à trois étages. Le besoin en d'éclairage est toujours constant. Le scénario S1 ne consomme pas d'énergie pour chauffer, en effet la répartition de l'éclairage sur toute la journée compense tout le besoin en chauffage par la suite le scénario S1 permet d'avoir légèrement moins de besoin d'énergie total pour chauffer et éclairer. D'après la figure 4.30, ce scénario économise 100 % l'énergie consommée par le chauffage dans les autres cas de scénario.

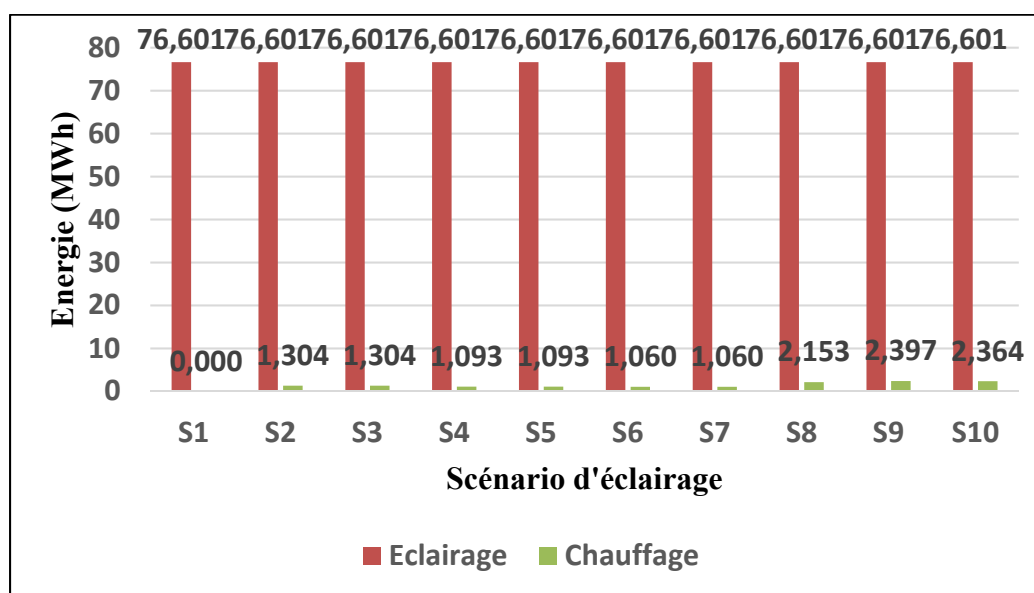


Figure 4.29 Besoin en éclairage et chauffage annuels par scénario d'éclairage (Serre opaque à Jonquières, trois niveaux de culture des fraises)

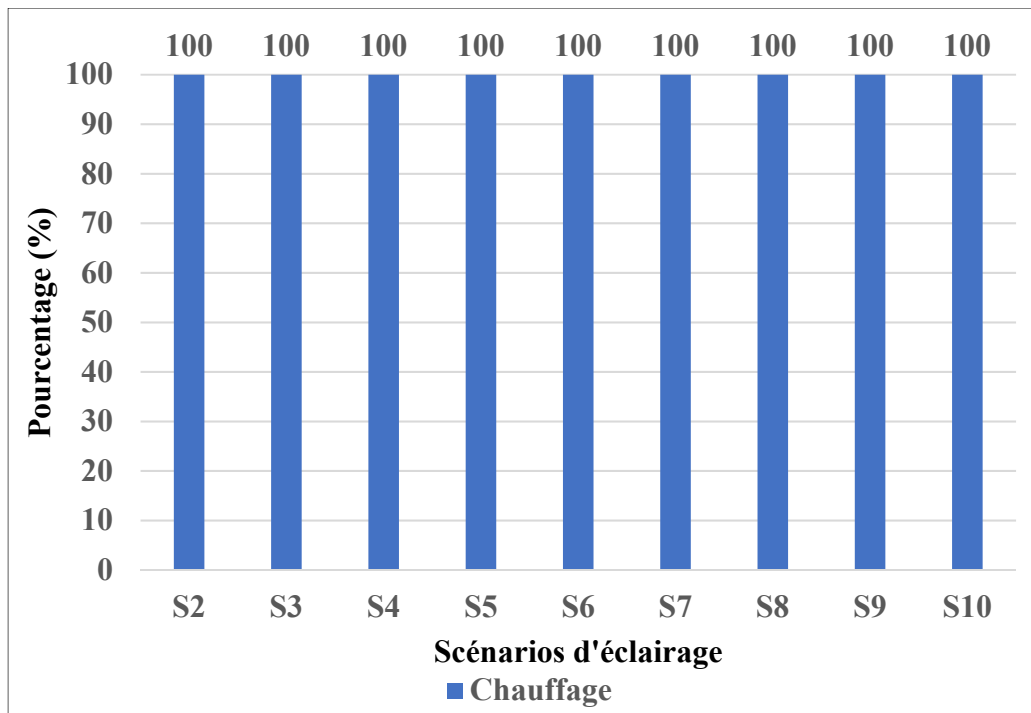


Figure 4.30 Besoin en éclairage annuel économisé par scénario d'éclairage (Serre opaque à Jonquières, trois niveaux de culture des fraises)

4.8 Impact du PV direct pour l'éclairage et chauffage sur la consommation d'énergie du réseau pour serre à 1, 2 et 3 niveaux

Des systèmes photovoltaïques ont été ajoutés aux serres à un, deux et trois étages fonctionnant durant les photopériodes déterminées dans la simulation 6 et qui permettent d'avoir le moindre besoin en éclairage et chauffage pour optimiser le nombre de panneaux photovoltaïques. Afin d'observer l'impact des systèmes photovoltaïques alimentant l'éclairage et le chauffage sur la consommation d'énergie du réseau, la simulation 7 a été réalisée.

Les figures 4.31, 4.32 et 4.33 représentent le pourcentage de l'énergie tirée du réseau et l'énergie photovoltaïque alimentant le chauffage et l'éclairage et le taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque produite respectivement pour une serre à un niveau, deux niveaux et trois niveaux en fonction du nombre de panneaux installés.

Pour la serre à un niveau, l'énergie photovoltaïque intervient avec un très faible pourcentage pour alimenter le système de chauffage et d'éclairage et l'énergie tirée du réseau est plus que 90 % peu importe le nombre de capteurs comme indiqué dans la figure 4.31. Ceci est dû à une alimentation d'éclairage entre minuit et huit heures durant cette période la production photovoltaïque est très faible donc elle ne peut pas supporter le besoin. Aussi la serre n'a pas besoin d'une grande quantité d'énergie pour le chauffage et l'énergie photovoltaïque produite pendant la journée n'est pas utilisée ce qui explique le faible taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque produite.

Dans le cas d'une serre à deux niveaux, l'énergie photovoltaïque intervient toujours avec un très faible pourcentage pour alimenter le système de chauffage et d'éclairage et l'énergie tirée du réseau est plus que 88 % comme montré dans la figure 4.32. Cela est justifié par un éclairage alimenté entre minuit et huit heures et entre seize heure et minuit donc l'énergie photovoltaïque intervient durant le début et la fin de la journée seulement pour alimenter l'éclairage et pendant la journée pour alimenter le chauffage qui ne demande pas beaucoup d'énergie à son tour.

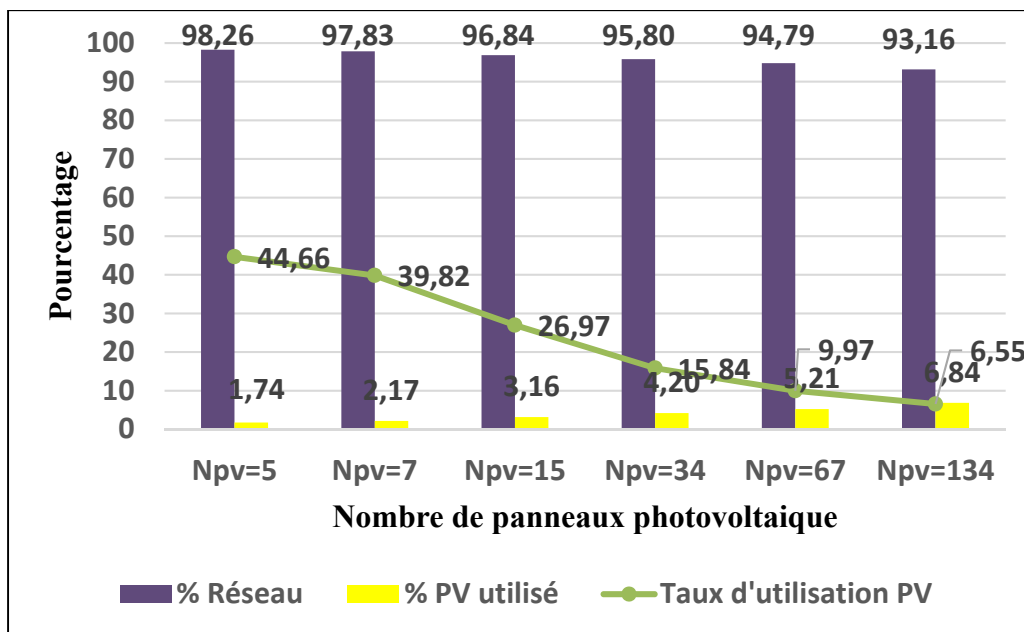


Figure 4.31 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque (serre opaque à Jonquière, un étage de culture des tomates, chauffages et éclairages, Scénario S1)

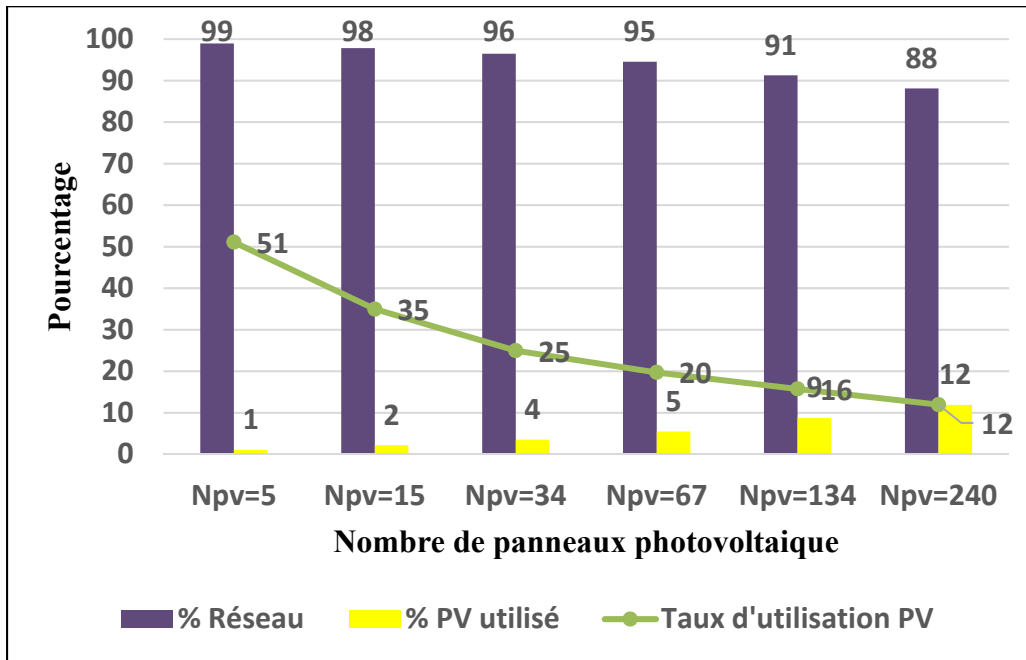


Figure 4.32 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque (serre opaque à Jonquière, deux étages de culture des tomates, chauffage et éclairage, Scénario S2)

Dans le cas d'une serre à trois étages, l'énergie photovoltaïque intervient dans l'alimentation du système d'éclairage et chauffage avec un pourcentage plus important et même le taux d'utilisation peut atteindre le 100 % pour un nombre de panneaux égal à 34 comme indiqué dans la figure 4.33. En effet un éclairage sur toute la journée permet d'utiliser toute l'énergie photovoltaïque produite pour alimenter les lampes pendant la journée à moins que le système photovoltaïque produise beaucoup plus que le besoin ce qui influence le taux d'utilisation.

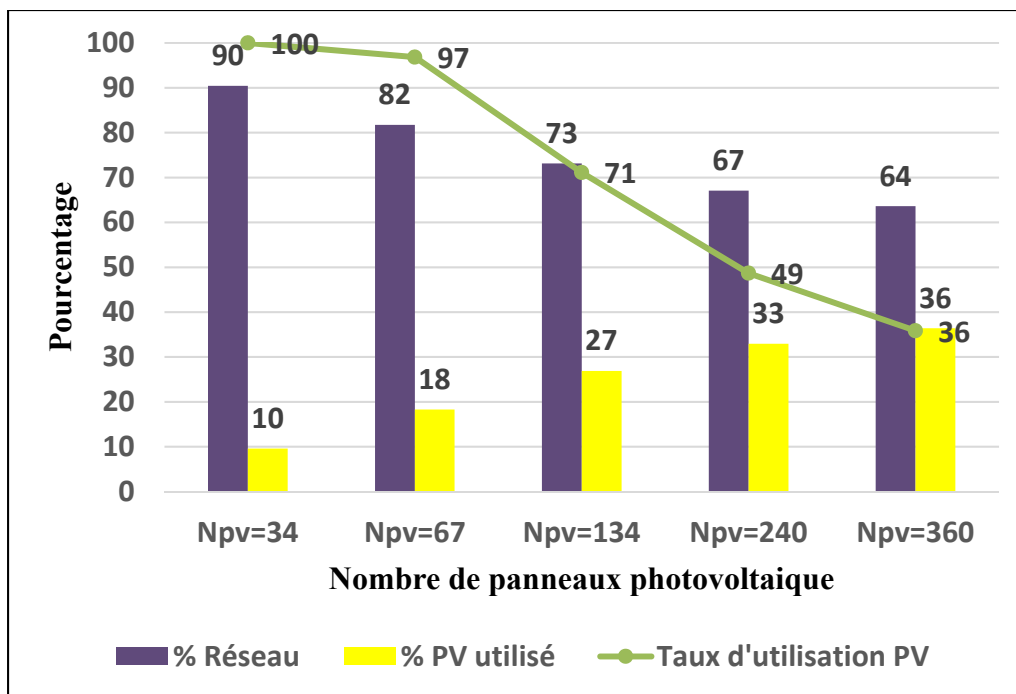


Figure 4.33 Énergie tirée du réseau, du système photovoltaïque et taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque (serre opaque à Jonquière, trois étages de culture des tomates, chauffage et éclairage, Scénario S1)

Dans une serre à trois étages, pour alimenter l'éclairage et le chauffage la puissance photovoltaïque est utilisée toute la journée, dans une serre à deux étages est utilisée le matin tôt et la fin de la journée cependant pour une serre à un niveau elle est utilisée le matin tôt seulement. Ceci explique un taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque plus important dans la figure 4.33 que dans la figure 4.32 et 4.31.

L'intégration du système photovoltaïque pour une serre à trois étages est beaucoup plus attirante et elle est fortement influencée par la période d'éclairage autrement dit la photopériode.

4.9 Optimiser les photopériodes en se basant sur le rendement du système photovoltaïque le plus élevé pour une serre à 1, 2 et 3 niveaux

Cette partie consiste à déterminer la photopériode à cibler pour avoir un taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque le plus élevé dans une serre à un, deux et trois niveaux en exécutant la simulation 8.

La figure 4.34 décrit les taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque en fonction du nombre de panneaux installés pour les trois scénarios de photosynthèse dans une serre à un étage de culture. Le scénario S2 est marqué par un taux d'utilisation le plus élevé dans tous les cas de la puissance installée. En effet ce taux varie de 92.5 % pour un nombre de PV égal à 5 jusqu'à 59 % pour un nombre de panneaux égal à 134.

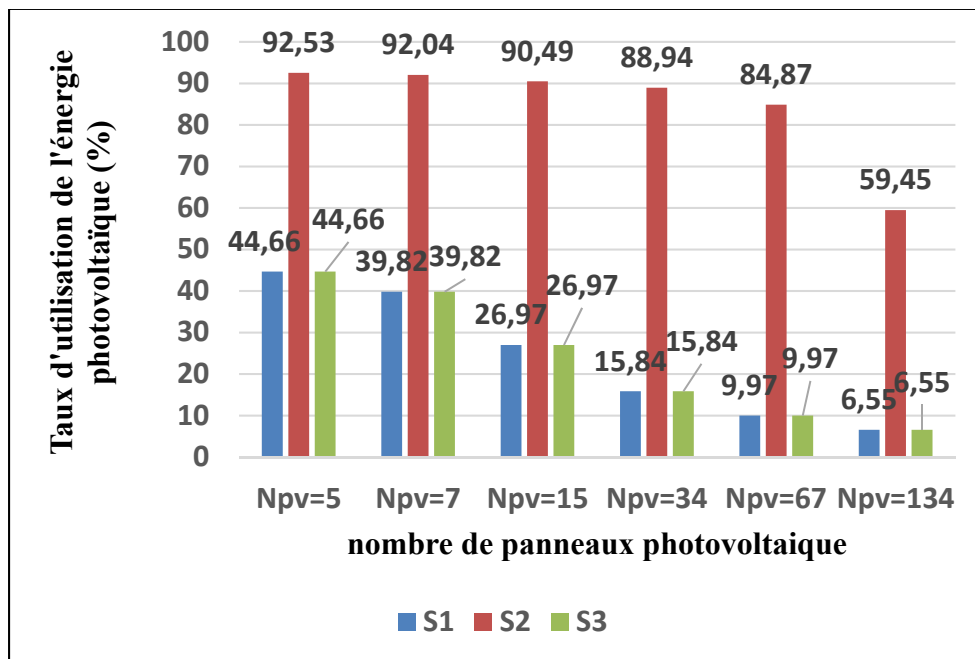


Figure 4.34 Taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuels par panneaux installés pour plusieurs scénarios d'éclairage (serre opaque à Jonquière, un étage de culture des fraises)

La figure 4.35 décrit les taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque en fonction du nombre de panneaux installés pour les six scénarios de photosynthèse dans une serre à deux étages de culture. Pour un nombre de panneaux installés entre 5 et 67, le scénario de photopériode S1 possède un taux d'utilisation photovoltaïque le plus élevé qui varie entre 98 % et 94 %. Mais pour un nombre de panneaux égal à 134 et 240, le scénario de photopériode S5 devient plus attirant avec un taux d'utilisation égale à 84 % et 63 % respectivement.

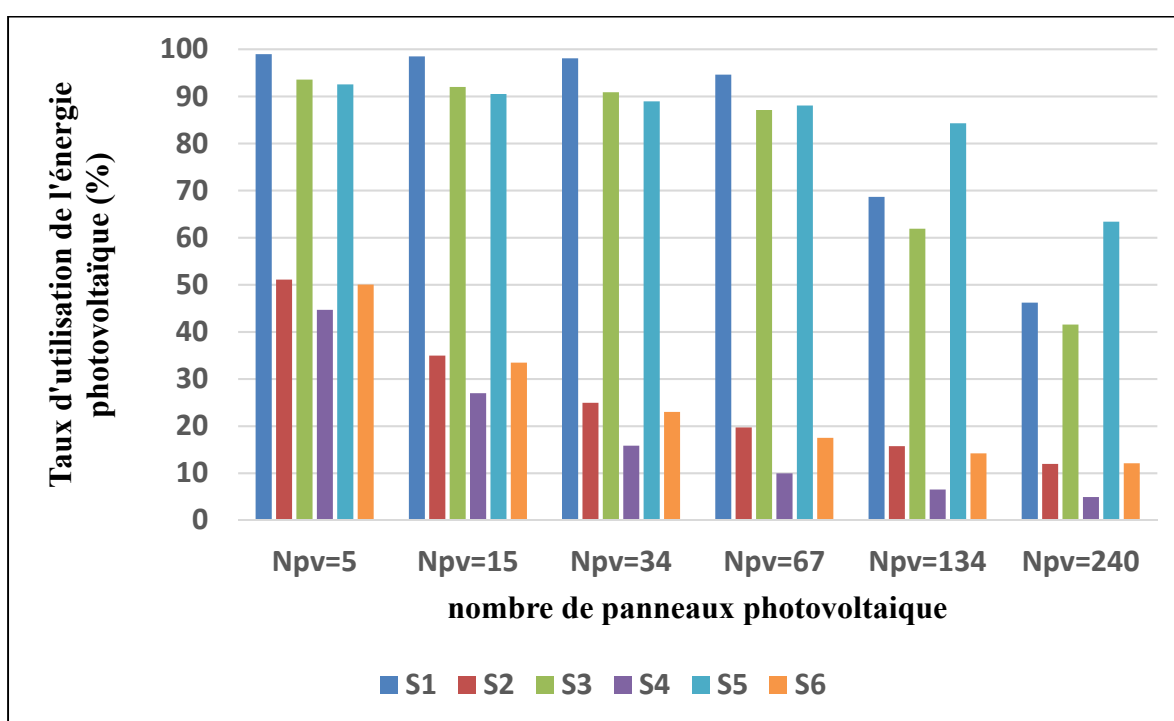


Figure 4.35 Taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuels par panneaux installés pour plusieurs scénarios d'éclairage (serre opaque à Jonquières, deux étages de culture des fraises)

Concernant la serre à trois étages, les taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque produite sont présentés dans la figure 4.36 en fonction du nombre de panneaux installé. Il est noté qu'il y a plusieurs scénarios de photopériode qui sont intéressants selon la puissance installée. Pour un nombre de panneaux égal à 34, le scénario S1 possède un taux d'utilisation plus élevé, mais il est proche du taux d'utilisation dans le cas de S2 et S3. En augmentant le nombre de panneaux à 67 et 134, les scénarios S2 et S3 sont plus intéressants avec un taux

d'utilisation entre 93 % et 97 %. En augmentant plus le nombre de panneaux à 240 et 360, le scénario S9 est classé premier avec un taux d'utilisation qui vaut respectivement 78 % et 63 %.

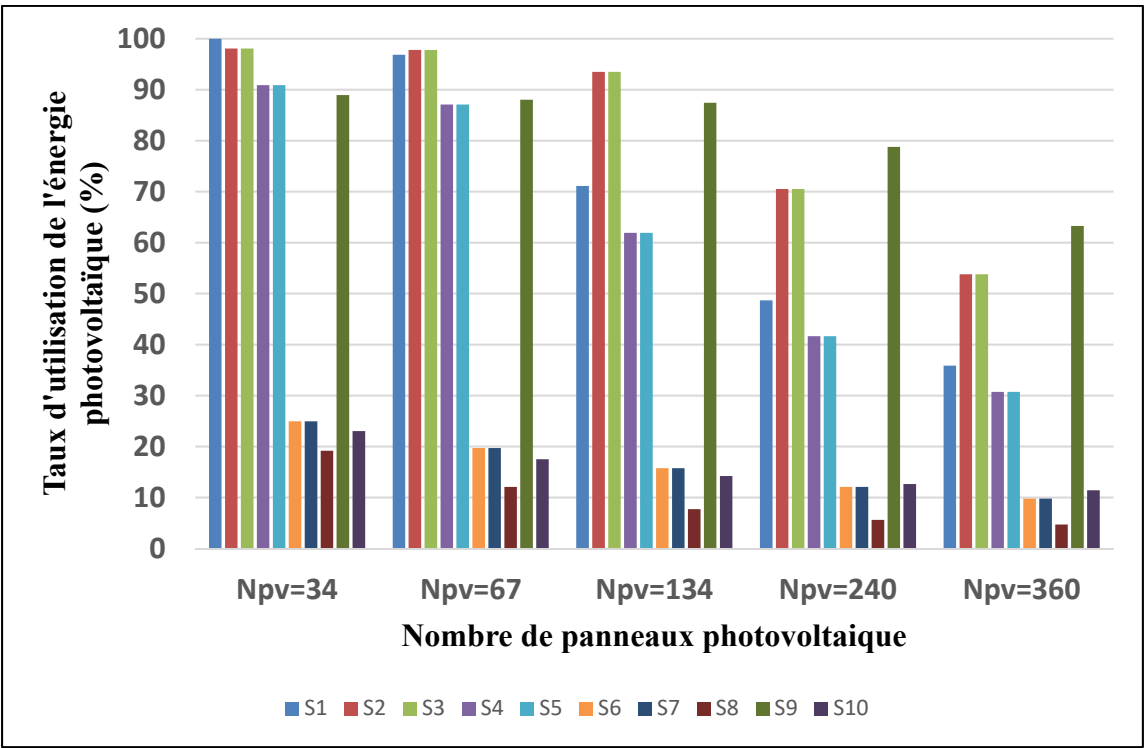


Figure 4.36 Taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque annuel par panneaux installés pour plusieurs scénarios d'éclairage (serre opaque à Jonquière, trois étages de culture des fraises)

Plus le nombre d'étages augmente, plus les scénarios augmentent et par la suite la décision de la photopériode optimale devient de plus en plus difficile. Pour cela une comparaison entre les scénarios de photopériode permettant d'avoir le moindre besoin en chauffage et éclairage et les scénarios de photopériode permettant d'avoir un taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque plus élevé sont comparés dans la partie qui suit.

4.10 Comparaison des photopériodes optimales

Deux méthodes sont suivies pour optimiser la photopériode et le nombre de panneaux à installer. Dans la première méthode, la photopériode qui permet d'avoir le moindre besoin en

chauffage et éclairage est sélectionnée (Simulation 6), ensuite, un système photovoltaïque est intégré pour choisir le nombre de panneaux à installer (Simulation 7) en étudiant l'évolution de son taux d'utilisation et le pourcentage de la puissance photovoltaïque alimentant le système d'éclairage et chauffage en fonction du nombre de panneaux installé.

Dans la deuxième méthode, un système photovoltaïque est intégré dans la serre fonctionnant à tous les scénarios d'éclairage possible pour déterminer le scénario qui laisse avoir un taux d'utilisation photovoltaïque et pourcentage de la puissance photovoltaïque alimentant le système d'éclairage et chauffage les plus élevés (Simulation 8).

Une comparaison entre les scénarios de photopériode trouvé par les deux méthodes est établie dans le tableau 4.5 pour une serre à un seul étage de culture, dans le tableau 4.6 pour une serre à deux étages de culture et dans le tableau 4.7 pour une serre à trois étages de culture. Cette comparaison prend en compte le besoin en chauffage et éclairage, le taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque et le pourcentage provenant de la puissance photovoltaïque alimentant le système de chauffage et d'éclairage.

Tableau 4.4 Comparaison des photopériodes pour une serre opaque à Jonquières à un étage de culture des fraises

Nombre de panneaux	5	7	15	34	67	134
Scénario S1 (Obtenu par la simulation 6)						
Besoin en chauffage et éclairage	27.68 MWh					
Taux d'utilisation	45 %	40 %	27 %	16 %	10 %	7 %
% PV	1.8 %	2.1 %	3.1 %	4.2 %	5.2 %	6.8 %
Scénario S2 (Obtenu par la simulation 8)						
Besoin en chauffage et éclairage	27.93 MWh					
Taux d'utilisation	92.5 %	92.03 %	90.5 %	88.9 %	84.8 %	59.4 %
% PV	3.5 %	4.9 %	10.4 %	23.4 %	43.9 %	61.6 %

Pour une serre à un étage de culture, le scénario de photopériode qui permet d'avoir un taux d'utilisation le plus élevé est S2, le taux d'utilisation varie de 92.5 % pour nombre de panneaux égal à 5 jusqu'à 59.4 % pour un nombre de panneaux égal à 134. En contrepartie,

ce scénario laisse le besoin de la serre en éclairage et chauffage augmenter de 0.9 % par rapport au scénario S1 qui est négligeable devant le gain de l'énergie photovoltaïque.

Pour une serre à deux étages de culture, le scénario de photopériode S1 obtenu par la simulation 8 donne la possibilité d'avoir des taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque plus élevé que le scénario S2 peu importe la puissance installée et plus élevé que le scénario S5 pour un nombre de panneaux situés entre 5 et 67. Pour un nombre de panneaux égal à 67, c'est vrai que le besoin en chauffage et éclairage augmentera de 0.25 MWh, mais 94.6 % de l'énergie photovoltaïque produite sera utilisé et 74.9 % de l'énergie photovoltaïque produite sera sauvée par rapport au scénario S2. Ce choix permet au système photovoltaïque d'intervenir dans l'alimentation du chauffage et l'éclairage avec un pourcentage égal à 26.1 %. Pour augmenter beaucoup plus ce pourcentage jusqu'à 45.6 % avec un taux d'utilisation égale à 84.2 % et 61.5 % avec un taux d'utilisation égale à 63.4 % le scénario de photopériode S5 est le meilleur, mais le besoin en chauffage et éclairage augmentera de 2.57 % par rapport à S1.

Tableau 4.5 Comparaison des photopériodes pour une serre opaque à Jonquières à deux étages de culture des fraises

Nombre de panneaux	5	15	34	67	134	240
Scénario S2 (Obtenu par la simulation 6)						
Besoin en chauffage et éclairage	52.12 MWh					
Taux d'utilisation	51.1 %	34.9 %	24.9 %	19.7 %	15.7 %	11.9 %
% PV	1.05 %	2.17 %	3.51 %	5.47 %	8.74 %	11.88 %
Scénario S1 (Obtenu par la simulation 8)						
Besoin en chauffage et éclairage	52.37 MWh					
Taux d'utilisation	98.9 %	98.4 %	98.1 %	94.6 %	68.6 %	46.2 %
% PV	2.0 %	6.1 %	13.7 %	26.1 %	37.9 %	45.7 %
Scénario S5 (Obtenu par la simulation 8)						
Besoin en chauffage et éclairage	53.46 MWh					
Taux d'utilisation	92.5 %	90.4 %	88.9 %	88.0 %	84.2 %	63.4 %
% PV	1.7 %	5.5 %	12.2 %	23.8 %	45.6 %	61.5 %

Concernant la serre à trois étages de culture, l'énergie photovoltaïque produite est utilisée à 100 % uniquement dans le scénario S1 pour un nombre de panneaux égal à 34 en plus d'un moindre besoin en éclairage et chauffage. Mais le pourcentage de la puissance photovoltaïque alimentant le système de chauffage et éclairage est faible dans l'ordre de 10 %. Le scénario S2 permet d'augmenter ce pourcentage jusqu'à 34.5 % avec un taux d'utilisation égale à 93.4 % et un nombre de panneaux égal à 134, mais le besoin en chauffage et éclairage augmentera de 1.3 MWh. Le scénario S9 est aussi attirant pour de grands nombres de panneaux installés 240 et 360. En effet, le système photovoltaïque dans ce cas est capable de donner 62.2 % de l'énergie demandée avec un taux d'utilisation égale à 63.2 %, mais la consommation d'énergie par le chauffage et l'éclairage augmentera de 2.4 MWh.

Tableau 4.6 Comparaison des photopériodes pour une serre opaque à Jonquière à trois étages de culture des fraises

Nombre de panneaux	34	67	134	240	360
Scénario S1 (Obtenu par la simulation 6)					
Besoin en chauffage et éclairage	76.6 MWh				
Taux d'utilisation	100 %	97 %	71 %	49 %	36 %
% PV	10 %	18 %	27 %	33 %	36 %
Scénario S2 (Obtenu par la simulation 8)					
Besoin en chauffage et éclairage	77.9 MWh				
Taux d'utilisation	98.0 %	97.7 %	93.4 %	70.5 %	53.7 %
% PV	9.2 %	18.1 %	34.7 %	46.9 %	53.6 %
Scénario S9 (Obtenu par la simulation 8)					
Besoin en chauffage et éclairage	79 MWh				
Taux d'utilisation	88.9 %	88.0 %	87.4 %	78.7 %	63.2 %
% PV	8.2 %	16.1 %	32.0 %	51.6 %	62.2 %

Le choix de la photopériode dans les serres en tenant compte du taux d'utilisation des panneaux photovoltaïques est beaucoup plus attirant qu'en tenant compte du besoin en chauffage et éclairage total, car la variation de cette dernière est faible d'un scénario à un autre, cependant le taux d'utilisation et le pourcentage de l'énergie photovoltaïque alimentant

le système de chauffage et éclairage varient fortement en variant les photopériodes. Cet élément sera une clé dans le dimensionnement éventuel d'un système qui vise une rentabilité technicoéconomique.

CONCLUSION

En climat froid, la culture sous serre joue un rôle important dans le soutien de l'alimentation locale et l'augmentation de l'autonomie alimentaire puisqu'elle améliore la production des plantes, accélère leur croissance et permet de les produire indépendamment des saisons. En revanche, la production en serre requiert une grande quantité d'énergie pour alimenter les systèmes permettant de maintenir des conditions climatiques nécessaires à la croissance des plantes comme le système de chauffage et d'éclairage.

Pour améliorer l'efficacité énergétique des entreprises serricoles et pour réduire les gaz à effet de serre, plusieurs sources d'énergie renouvelables ont été intégrées dans les serres spécialement l'énergie photovoltaïque.

Dans ce mémoire, une étude de l'impact des panneaux photovoltaïques en branchement direct sur la consommation d'énergie de la serre tirée du réseau, de la variation du besoin en chauffage et éclairage d'une serre à la suite de la variation de la position géographique, du type de serre, du type de culture, de la photopériode et de l'alternance des étages de culture a été envisagé.

Pour réaliser cette étude, un modèle a été développé sur l'environnement Matlab. Ce modèle permet de calculer d'une façon approximative le besoin d'énergie en chauffage et éclairage dans deux types de serres : opaque et transparente afin de dimensionner le système photovoltaïque direct alimentant les serres. Essentiellement, le modèle a pour but de calculer l'énergie photovoltaïque produite et de juger son intégration dans les serres agricole. Le modèle se base sur des données d'entrées saisies par l'utilisateur : les données météorologiques sur toute l'année, les conditions de culture, les propriétés des deux types de serres, les propriétés du système photovoltaïque, les propriétés du système d'éclairage et les propriétés du bâtiment bénéficiant des rejets thermiques.

Dans le présent travail, huit regroupements de simulations ont été effectuées sur les 8760 heures que composent une année en variant les données d'entrée. Les lieux géographiques utilisés dans ces simulations sont : Montréal-Est, Jonquière et La Grande IV, les plantes cultivées sont les tomates et les fraises et le nombre d'étages de culture est entre un et trois.

Des résultats bruts importants ont découlé des simulations réalisées et exportées sur Excel, leur traitement a permis de conclure que la serre opaque consomme une grande quantité d'énergie pour alimenter le système l'éclairage artificiel seulement, mais elle reste plus énergivore et possède un besoin en chauffage et éclairage trois fois moins que la serre transparente située dans le même endroit. Même en allant à des emplacements plus nordiques, la serre opaque est d'autant plus attirante. Les résultats ont montré aussi que la culture des tomates dans la serre opaque est plus économique que les faire pousser dans les serres transparentes tandis que pour les fraises la différence de consommation de chauffage et éclairage entre une serre opaque et une serre transparente n'est pas grande. Aussi l'intégration du système photovoltaïque dans une serre à un seul étage de culture de tomate possède un taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque produite plus important que dans une serre transparente.

Les résultats ont permis de comparer le besoin d'énergie en chauffage et éclairage d'une serre opaque selon le nombre d'étages de culture pendant plusieurs plages de photopériode et il a été montré qu'une serre à plusieurs étages fonctionnant simultanément et dédiée à la culture des fraises à Jonquière possède un besoin en chauffage et éclairage inférieur si elle fonctionne entre minuit et huit heures le matin. Cependant, l'alternance entre les étages a laissé trouver d'autres photopériodes qui consomment moins d'énergie assurant le chauffage et l'éclairage variant selon le nombre d'étages de culture. Par exemple pour une serre à trois étages la photopériode la plus économique est celle qui s'étende sur toute la journée en divisant les 24h de façon équivalente entre les trois étages.

Après avoir fixé une durée de photosynthèse, le système photovoltaïque a été intégré et les résultats ont montré que la fixation de la photopériode influence et limite le taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque produite. Et il a été prouvé dans le présent travail que le choix de la photopériode en prenant compte du taux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque est beaucoup plus attirant, car il permet d'atteindre des taux d'utilisation qui dépassent les 90 % pour une différence de besoin en chauffage et éclairage d'un scénario de photopériode à une autre qui est relativement petite.

Il est primordial de valider expérimentalement le modèle et les résultats obtenues et de définir leurs degrés de confiance dans les conditions réelles en réalisant un prototype d'une serre opaque et transparente alimentées par l'énergie photovoltaïque direct et par le réseau.

Ce travail réalisé ouvre des pistes de réflexion et plusieurs axes de recherche complémentaires. Parmi les suites possibles de cette étude, la prise en compte de la consommation d'énergie d'autre système de contrôle du climat dans la serre comme le système de ventilation, de concentration en CO₂, d'humidification et déshumidification serait une bonification pertinente

Étant donné que l'analyse des rejets thermique et leur influence sur l'estimation du besoin en chauffage et éclairage ont été à la limite de notre étude et ils dépendent fortement de la validité du modèle, l'ajustement du modèle thermique est nécessaire pour bien quantifier les surplus de chaleur l'ajout d'un système de stockage thermique qui permet de stocker le surplus de chaleur pour diminuer la charge de chauffage peut être une perspective à ce projet et les valoriser.

Aussi l'intégration d'un système de stockage électrique de l'énergie photovoltaïque non utilisée est suggérée comme travaux futurs. Ce système de stockage permet de profiter de l'énergie photovoltaïque pour alimenter le système d'éclairage durant la nuit dans une serre opaque et pour alimenter le chauffage durant la nuit dans la serre transparente. Toutefois Les batteries dispendieuses et affecteront la rentabilité. Des alternatives de stockage comme des circuits à base de supercondensateurs pourraient être investiguées.

ANNEXE I

Valorisation des surplus de chaleur à l'intérieur de la serre

Cette partie consiste à valoriser les rejets thermiques en utilisant les surplus de chaleur rejetée par la serre pour satisfaire le besoin de tous types d'utilisateurs par exemple un bâtiment commercial. La valorisation des rejets thermique est une opportunité qui permet d'éviter le gaspillage, de diminuer l'émission de CO₂ et de réaliser un gain économique en diminuant l'achat d'énergie extérieur. Les résultats obtenus dans cette partie dépendent de la validité du modèle conçu dans le présent travail.

Dans le présent travail, une valorisation externe couvrant les besoins de chauffage d'un bâtiment commercial est choisie. Le modèle permet de calculer la quantité des rejets thermiques horaires qui peuvent être valorisés et le volume qui peut être chauffé dans un bâtiment en s'appuyant sur le calcul des déperditions volumique horaire. Ces déperditions sont calculées à l'aide de l'équation A :

$$Q_{déperdition} = V_{bâtiment} \times C_{déperdition} \times (T_{int} - T_{ext}) \quad (A)$$

$V_{bâtiment}$ représente le volume du bâtiment en m³, $C_{déperdition}$ désigne le coefficient de déperdition volumique en W.m⁻³. °C⁻¹ et T_{int} et T_{ext} sont respectivement la température intérieure à atteindre dans le bâtiment et la température extérieure en °C.

Le calcul du volume du bâtiment chauffé chaque heure ainsi que les rejets thermiques horaires restants est fait en suivant l'organigramme de la figure 1 :

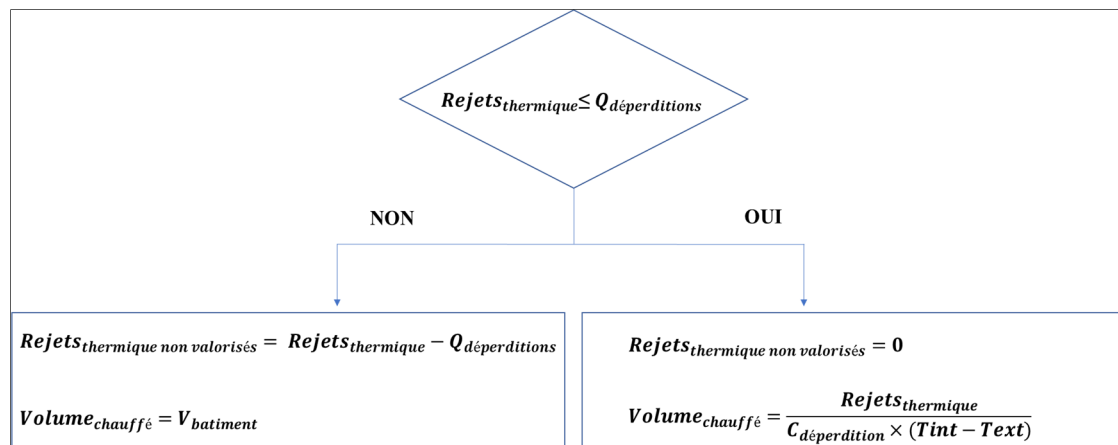


Figure1 : Organigramme de calcul des rejets thermiques non valorisés et du volume chauffé

Le bâtiment correspond à l'enceinte qui va bénéficier des rejets thermiques de la serre pour satisfaire son besoin en chauffage. Trois caractéristiques sont demandées dans le fichier Excel pour simuler le modèle : le coefficient de déperdition volumique selon la norme d'isolation thermique RT 2005, la température de consigne à atteindre et le volume qui va être variable d'une simulation à une autre. Les valeurs choisies de ces caractéristiques sont englobées dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Caractéristiques du bâtiment à chauffer

Bâtiment à chauffer	
Coefficient de déperdition volumique (W.m ⁻³ .°C)	0.65
Température de consigne (°C)	20
Volume (m ³)	Variable selon la simulation

Les rejets thermiques dégagés par les serres à un, deux et trois étages de culture fonctionnant aux scénarios de photopériode déterminés dans la simulation 6 sont valorisés en les utilisant pour réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment. Cette partie présente les résultats de la simulation 9.

La figure 2 décrit l'évolution des rejets thermiques utilisés en fonction du volume de bâtiment pour le cas d'une serre à un, deux et trois étages de culture. On a supposé le cas

idéal où 100 % des rejets sont valorisés, la réalité étant nécessairement moindre. Ceci permet de déterminer le volume critique au-delà duquel le pourcentage des rejets thermiques disponible demeure constant.

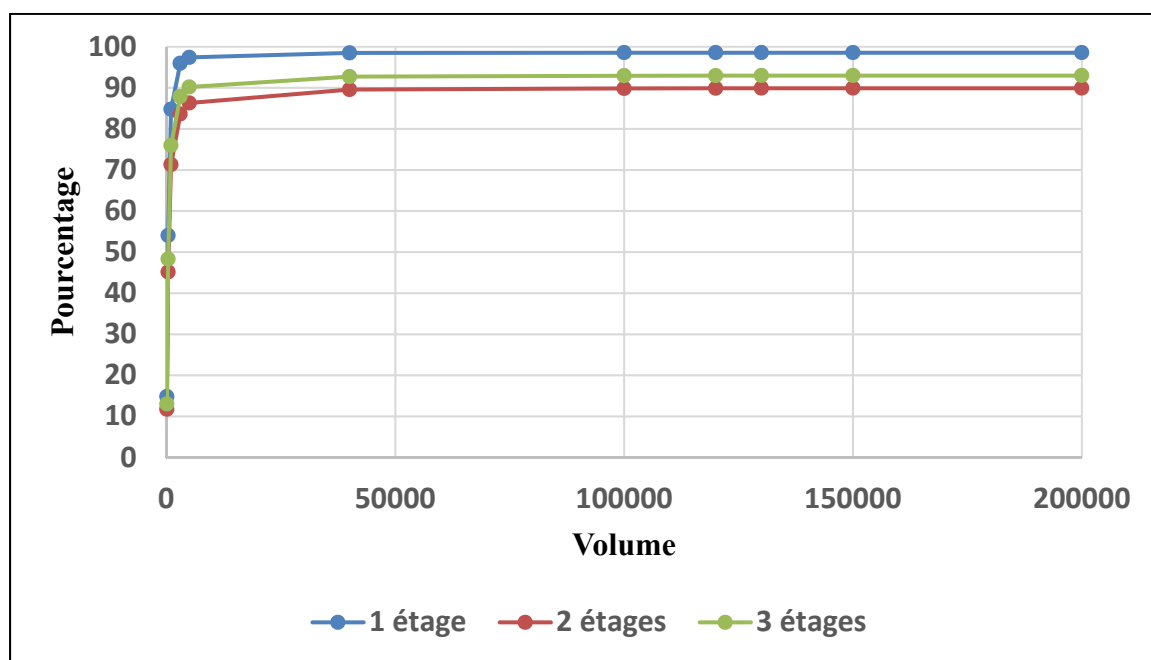


Figure 2 : Rejets thermique annuel utilisé par volume de bâtiment d'une serre opaque à Jonquière à un, deux ou trois étages de culture des fraises

Un volume de bâtiment supérieur ou égale à 150 000 m³ permet d'avoir une utilisation constante des rejets thermique, en effet plus que le volume est augmenté au-dessus de 150 000 m³, les rejets thermiques utilisés ne varient pas. Les rejets thermiques valorisés ne peuvent pas atteindre le 100 %, car le bâtiment n'a pas besoin de chauffage sur toute l'année et que le rendement de récupération des rejets ne peut être parfait

Il est démontré que le pourcentage des rejets thermique valorisée augmente avec l'augmentation du volume de bâtiment pour atteindre une valeur plafond. L'intégration des déperditions de chaleur par le bâtiment retenu au modèle nous amène aux résultats qui suivent

BIBLIOGRAPHIE

- Abdel-Ghany, A. M., & Kozai, T. (2006). On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer. *Energy Conversion and Management*, 47(15–16), 2612–2628. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.024>
- Abdelhamid, H. (2020). *SYS 864 SYSTÈME D ' ENERGIES RENOUVELABLES*.
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018). A quasi-steady state model for predicting the heating requirements of conventional greenhouses in cold regions. *Information Processing in Agriculture*, 5(1), 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.003>
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2019). Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*, 178, 9–33. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017>
- Ahamed, M. S., Guo, H., Taylor, L., & Tanino, K. (2019). Heating demand and economic feasibility analysis for year-round vegetable production in Canadian Prairies greenhouses. *Information Processing in Agriculture*, 6(1), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.08.005>
- Ahamed, S., Guo, H., & Tanino, K. (2018). *A quasi-steady state model for predicting the heating requirements of conventional greenhouses in cold regions*. 5, 33–46.
- Ahn, B., Jang, C., Leigh, S., Yoo, S., & Jeong, H. (2020). Effect of LED lighting on the cooling and heating loads in office buildings. *Applied Energy*, 113(2014), 1484–1489. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.050>
- Allik, A., Lill, H., & Annuk, A. (2019). Effects of price developments on photovoltaic panel to inverter power ratios. *8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2019*, 371–376. <https://doi.org/10.1109/ICRERA47325.2019.8997104>
- Atlam, O., Barbir, F., & Bezmalinovic, D. (2011). A method for optimal sizing of an electrolyzer directly connected to a PV module. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(12), 7012–7018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.073>
- Azzolini, J. A., & Tao, M. (2018). A control strategy for improved efficiency in direct-coupled photovoltaic systems through load management. *Applied Energy*, 231(September), 926–936. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.198>

- Banakar, A., Montazeri, M., Ghobadian, B., Pasharshahi, H., & Kamrani, F. (2021). Energy analysis and assessing heating and cooling demands of closed greenhouse in Iran. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25(June), 101042. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101042>
- Bekkouché, M. R. Y. S. M. a. (2008). Conception et validation d ' un programme sous Excel pour l ' estimation du rayonnement solaire incident en Algérie . Cas d ' un ciel totalement clair. *Revue*, 11, 423–436.
- Benghanem, M., Daffallah, K. O., Joraid, A. A., Alamri, S. N., & Jaber, A. (2013). Performances of solar water pumping system using helical pump for a deep well: A case study for Madinah, Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 65, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.013>
- Benis, K., Reinhart, C., & Ferrão, P. (2017). Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts. *Journal of Cleaner Production*, 147, 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130>
- Benkaciali, S., & Gairaa, K. (2015). Techniques de modélisations de l'irradiation solaire sur un plan incliné. *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology*, 3, 102–108.
- Bernard, L.-B. (1987). *CONCEVOIR SA MAISON SOLAIRE*.
- Bostan, I., Guțu, A., & Guțu-Chetrușca, C. (2019). The Photovoltaic Greenhouses - A Challenge for Republic of Moldova. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems, SIELMEN 2019 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2019.8905838>
- BP Energy outlook. (2021). Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy. *BP Energy Outlook 2021*, 70, 8–20.
- Carbon Dioxide In Greenhouses*. (n.d.). Retrieved February 8, 2022, from <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/00-077.htm>
- Chandel, S. S., Naik, M. N., & Chandel, R. (2017). Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(February), 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.019>
- Chau, J., Sowlati, T., Sokhansanj, S., Preto, F., Melin, S., & Bi, X. (2009). Techno-economic analysis of wood biomass boilers for the greenhouse industry. *Applied Energy*, 86(3), 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.05.010>

- Choab, N., Allouhi, A., Maakoul, A. El, Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2021). Effect of Greenhouse Design Parameters on the Heating and Cooling Requirement of Greenhouses in Moroccan Climatic Conditions. *IEEE Access*, 9, 2986–3003. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047851>
- Cossu, M., Murgia, L., Caria, M., & Pazzona, A. (2010). Economic feasibility study of semitransparent photovoltaic technology integrated on greenhouse covering structures. *International Conference Ragusa SHWA2010*, 648–655.
- Culture des fraises en serre - Hors-sol et gestion du climat - Caldor*. (n.d.). Retrieved February 9, 2022, from <https://caldor.fr/cultures/fraise/>
- Culture des tomates en sol ou hors-sol, en serre*. (n.d.). Retrieved February 9, 2022, from <https://caldor.fr/cultures/tomates/>
- DOSSIER LED - ETAP*. (2018).
- Dubrova, Y. E. (2019). Photovoltaic systems for powering greenhouses. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Durable, H. (2009). *Isolation thermique*. 2013, 1–11.
- Eaves, J., & Eaves, S. (2018). Comparing the Profitability of a Greenhouse to a Vertical Farm in Quebec. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 66(1), 43–54. <https://doi.org/10.1111/cjag.12161>
- ÉCLAIRAGE DE PHOTOSYNTHÈSE*. (2018). 2014, 1–10.
- Éclairage pour serre - Extreme GreenLine G1 - Plantekno Plant and Agricultural Technology Co. Ltd. - à LED*. (n.d.). Retrieved February 9, 2022, from <https://www.agriexpo.online/fr/prod/plantekno-plant-and-agricultural-technology-co-ltd/product-183720-69690.html>
- Elias, M., Arof, A., & Nor, K. (2004). Design of high energy lithium-ion battery charger. *Australasian Universities ...*, September, 26–29. <http://archive.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec04/papers/PaperID160.pdf>
- Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2013). MPPT techniques for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 793–813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.022>
- Énergie*. (n.d.). <https://energieplus-lesite.be/techniques/eclairage10/luminaires/lampes-et-luminaires-led/?fbclid=IwAR3x0zWGE9nZaNxagvb10xvZ7zkhqs74UTJYWaaHXC0Q6XCXE-zEQJv9GUk>

Engineering, G. (1994). *Greenhouse Engineering*.

Esmaeli, H., & Roshandel, R. (2020). Optimal design for solar greenhouses based on climate conditions. *Renewable Energy*, 145, 1255–1265. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.090>

Expérience .. (n.d.).

Fahmy, F. H., Farghally, H. M., Ahmed, N. M., & Nafeh, A. A. (2012). Modeling and Simulation of Evaporative Cooling System in Controlled Environment Greenhouse. *Smart Grid and Renewable Energy*, 03(01), 67–71. <https://doi.org/10.4236/sgre.2012.31010>

FAO. (2017). Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries. In *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries*.

Fu, R., Feldman, D., Margolis, R., Woodhouse, M., Ardani, K., Fu, R., Feldman, D., Margolis, R., Woodhouse, M., & Ardani, K. (2017). U . S . Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2017 U . S . Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2017. *National Renewable Energy Laboratory*, September, 1–59. <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf>

G. N. Tiwari. (n.d.). G. N. Tiwari. Retrieved February 8, 2022, from https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=K5LVrc6k4WIC&oi=fnd&pg=PA1&ots=d1ThYshHWa&sig=Xq2f_EZz3ZZg2YstedGqtdyl1xs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Ghasemi Mobtaker, H., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., & Matloobi, M. (2016). Solar energy conservation in greenhouse: Thermal analysis and experimental validation. *Renewable Energy*, 96, 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.079>

Gourdo, L., Fatnassi, H., Tiskatine, R., Wifaya, A., Demrati, H., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2019). Solar energy storing rock-bed to heat an agricultural greenhouse. *Energy*, 169, 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.036>

Gouvernement du Québec. (n.d.). Retrieved February 8, 2022, from <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles/culture-fruits-legumes-serre-serriculture>

Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160(November 2017), 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>

- Graamans, L., van den Dobbelsteen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017). Plant factories; crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.003>
- Grand opening of SARA project in Japan*. (n.d.). Retrieved February 9, 2022, from <https://www.hortibiz.com/newsitem/news/essentials-for-growing-hydroponic-strawberries/>
- Guide to Indoor Strawberry Cultivation*. (n.d.). Retrieved February 9, 2022, from <https://pilight.com/indoor-strawberry-cultivation/>
- Gupta, M. J., & Chandra, P. (2002). Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy*, 27(8), 777–794. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00030-0)
- Hassan, Q., Jaszczur, M., & Przenzak, E. (2017). Mathematical model for the power generation from arbitrarily oriented photovoltaic panel. *E3S Web of Conferences*, 14. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171401028>
- Hassanien, R. H. E., Li, M., & Dong Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989–1001. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>
- Horti Generation*. (n.d.). https://horti-generation.com/fr/daily-light-integral-introduction-a-leclairage-artificielle/?fbclid=IwAR1op8ZiTUm9uZvoAG9tPVwdR3JattzIsb94rI1iKfSp2mC0oycAA2k_FbE
- Jamil, W. J., Abdul Rahman, H., Shaari, S., & Salam, Z. (2017). Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 876–891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.072>
- Joliet, O., Danloy, L., Gay, J.-B., Munday, G. L., & Reist, A. (1991). HORTICERN: an improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55(3), 265–294. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90066-Y](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90066-Y)
- Jomaa, M., Tadeo, F., & Mami, A. (2018). Modelling and control of greenhouses powered by a renewable energy system. *2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, STA 2017 - Proceedings, 2018-Janua*, 482–487. <https://doi.org/10.1109/STA.2017.8314903>
- Joun Worley. (2014). *Heating, Cooling and Ventilation*.
- Katzin, D., Marcelis, L. F. M., & Mourik, S. Van. (2021). Energy savings in greenhouses by

- transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Applied Energy*, 281(July 2020), 116019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116019>
- Kerkouche, K., Cherfa, F., Hadj, A., Bouchakour, A. S., Abdeladim, K., & Bergheul, K. (2013). Evaluation de l'irradiation solaire globale sur une surface inclinée selon différents modèles pour le site de Bouzaréah. *Revue Des Energies Renouvelables*, 16(May 2014), 269–284.
- Kiyan, M., Bingöl, E., Melikoğlu, M., & Albostan, A. (2013). Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink. *Energy Conversion and Management*, 72, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.036>
- Kolhe, M., Joshi, J. C., & Kothari, D. P. (2004). Performance analysis of a directly coupled photovoltaic water-pumping system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(3), 613–618. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.827032>
- Kozai, T. (2013). Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy Series B: Physical and Biological Sciences*, 89(10), 447–461. <https://doi.org/10.2183/pjab.89.447>
- Kumar, K. S., Tiwari, K. N., & Jha, M. K. (2009). *Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review*. 41, 1269–1275. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.003>
- Leveille-Guillemette, F., & Monfet, D. (n.d.). *COMPARISON OF DIFFERENT MECHANICAL SYSTEMS MODELS FOR A Frédéric Lévillé-Guillemette and Danielle Monfet Department of Construction Engineering , École de technologie supérieure ,.*
- Li, Y., Ding, Y., Li, D., & Miao, Z. (2018). Automatic carbon dioxide enrichment strategies in the greenhouse: A review. *Biosystems Engineering*, 171, 101–119. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.018>
- M'raoui, A., Mouhous, S., Malek, A., Benyoucef, B., Abou, U., Belkaïd, B., 199, B. P., & Tlemcen, A. (2011). Etude statistique du rayonnement solaire à Alger. *Revue Des Energies Renouvelables*, 14(November 2014), 637–648.
- Maroufmashat, A., Sayedin, F., & Khavas, S. S. (2014). An imperialist competitive algorithm approach for multi-objective optimization of direct coupling photovoltaic-electrolyzer systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(33), 18743–18757. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.125>
- Min, J., Park, Y., & Kang, S. (2014). Temperature distribution and performance of ground-coupled multi-heat pump systems for a greenhouse. *Renewable Energy*, 65, 49–55.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.010>

- National, G., & Pillars, H. (n.d.). *The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices*.
- National, G., & Pillars, H. (2003). *THE USE OF SUPPLEMENTAL LIGHTING FOR VEGETABLE CROP PRODUCTION: LIGHT INTENSITY, CROP RESPONSE, NUTRITION, CROP MANAGEMENT, CULTURAL, PRACTICES*.
- Ozgener, O., & Hepbasli, A. (2005). *Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system*. 37, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.003>
- Pakari, A., & Ghani, S. (2019). *Evaluation of a novel greenhouse design for reduced cooling loads during the hot season in subtropical regions*. 181(February), 234–242.
- Pelletier, F., & Sc, M. (2017). *Consommation d ' énergie et émissions de gaz à effet de serre en production sericole au Québec*.
- Petros Axaopoulos. (n.d.). *Rayonnement solaire sur les surfaces inclinées*.
- Rodrigues, E., & Melicio, R. (2011). *Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model Key words*. January, 6–11.
- Rousse, D. R., & Ph, D. (n.d.). *ENR810 – Énergies renouvelables 11 . L ' énergie solaire Plan de la présentation • Introduction et objectifs de la capsule*.
- Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(December 2016), 590–601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
- Sethi, V. P., Sumathy, K., Lee, C., & Pal, D. S. (2013). Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy*, 96, 56–82. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.034>
- Shivam, R., & Singh, S. (2015). International Journal of Scientific and Research Publications November 2015 Edition. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(11), 643–647.
- Shukla, K. N., Rangnekar, S., & Sudhakar, K. (2015). Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India. *Energy Reports*, 1, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2015.03.003>

- Simon Chretien. (n.d.). https://www.letravailleurfute.com/le-controle-adequat-des-conditions-de-croissance-des-plantes-augmente-vos-chances-de-succes-5ieme-partie/?fbclid=IwAR02jmmm-F0iR3aT0nnbBLdUGUP75tFBQy_4VKEviRKXg-Mrn2kgTKRJR9Y
- Son, J. E., Kim, H. J., & Ahn, T. I. (2020). *Plant Factory. An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. Academic Press: London, UK.
- SVETECH Light Longer. (n.d.). <https://www.svetoch.eu/fr/2018/05/25/refroidissement-et-gestion-thermique-des-leds-haute-puissance/?fbclid=IwAR3iH-F5g05lm-ps8F4VlrsiZwpGGKjmNuEw8P6FZuJCP4OYR8BUgiOA4fc#:~:text=Les diodes électroluminescentes haute puissance,et 30%25 de lumière>
- Talbot, M., & Monfet, D. (2018). Impact des plantes sur les charges d ' un espace d ' agriculture intégré au bâtiment : Implantation d ' un modèle de plantes. *Proceedings of ESIm 2018, May*.
- Technologies des éoliennes*. (n.d.). 1–31.
- Turcotte, G., Larouche, R., Carrier, A., & Lambert, L. (2015). Production de la tomate de serre au Québec. *Guide de Culture*, 297.
- Valera, M. D., Molina, A. F., Alvarez, M. A. (2008). *Protocolo de Auditoría Energética en Invernaderos Auditoría energética de un invernadero para cultivo de flor cortada*.
- Weight, L. B. (2018). *TopLight Fixture Dimensions*.
- Ye, H., Sau, K., Van Zeijl, H., Gielen, A. W. J., & Zhang, G. (2011). A review of passive thermal management of LED module. *Journal of Semiconductors*, 32(1). <https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/1/014008>
- Zhang, K., Yu, J., & Ren, Y. (2022). Research on the size optimization of photovoltaic panels and integrated application with Chinese solar greenhouses. *Renewable Energy*, 182, 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.031>
- Zhang, Y., Gauthier, L., De Halleux, D., Dansereau, B., & Gosselin, A. (1996). Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82(1–4), 227–244. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(96\)02332-5](https://doi.org/10.1016/0168-1923(96)02332-5)