

MEC 6214

Énergie Solaire et Applications – Hiver 2014

POLYTECHNIQUE
MONTREAL



Examen

Jeudi 27 février, 09h30 – 12h00

Pondération : 35 % de la note totale

Identification de l'étudiant(e)		Réservé
Nom :	Prénom :	Q1 /4
Signature :	Matricule :	Q2 /4
		Q3 /4
		Q4 /4
Documentation permise	1 feuille de format lettre (8.5" x 11") recto-verso	Q5 /4
Calculatrices	Non-programmables	TOTAL /20
Les cellulaires, agendas électroniques ou téléavertisseurs sont interdits.		

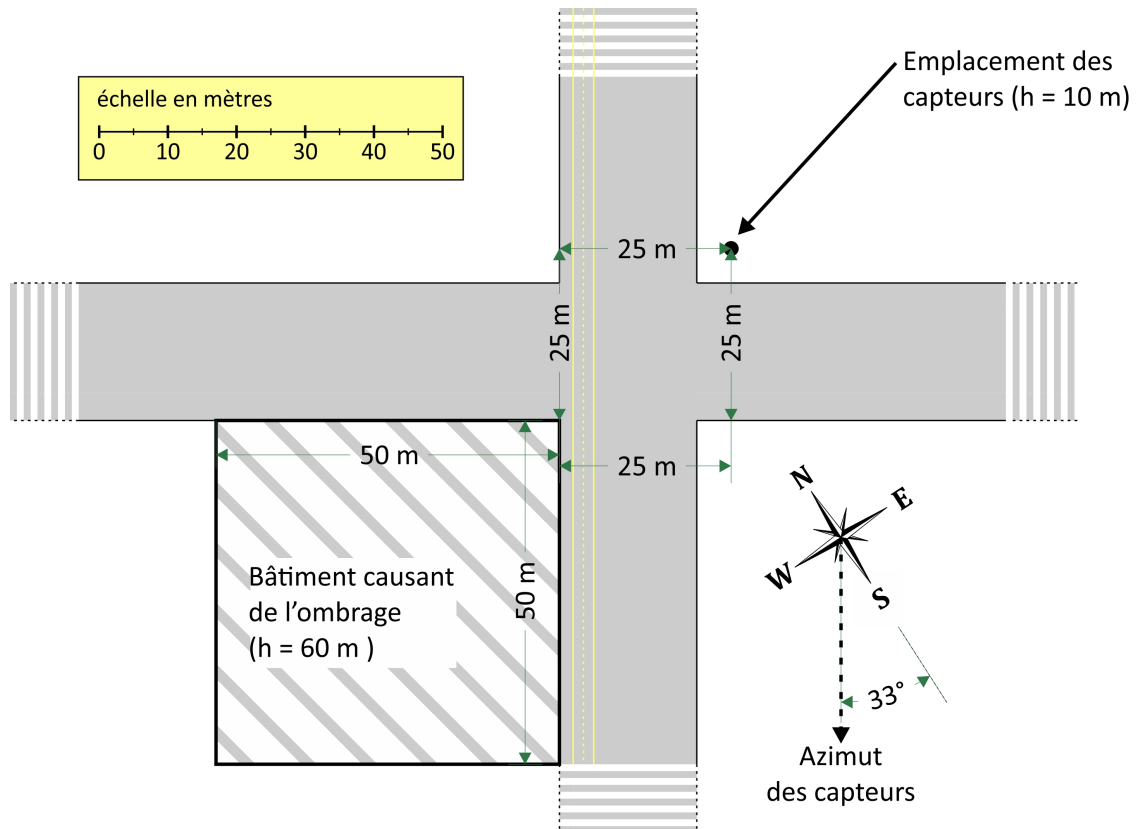
Instructions spéciales
<p>Faites tous vos calculs et indiquez tous vos résultats sur ce questionnaire. Chaque question comporte un espace pour indiquer vos calculs et donner la(les) réponse(s) finale(s). Si vous manquez de place vous pouvez utiliser le verso de n'importe quelle page (indiquez clairement la question à laquelle vos calculs se rapportent).</p> <p>L'information en annexe comporte des données supplémentaires pour certaines questions. Vous ne devez pas nécessairement utiliser toute cette information. Il y a souvent plusieurs manières de calculer un résultat : Figure, Table, Équation, etc. Vous pouvez utiliser le moyen de votre choix même s'il est moins précis. Indiquez toujours comment vous êtes arrivés à une réponse.</p> <p>L'examen comporte 5 questions sur 18 pages, pour un total de 20 points. Vous devez rendre l'entièreté du questionnaire.</p>

L'étudiant doit honorer l'engagement pris lors de la signature du code de conduite.

Question 1 (4 points)

On a installé des capteurs solaires sur le toit d'un bâtiment à Montréal (Latitude $45^{\circ}31' N$, Longitude $73^{\circ}35' W$). La figure ci-dessous montre un plan des environs. Les capteurs sont alignés avec la façade du bâtiment, ils sont orientés vers le bas de la figure (leur azimut est indiqué par la flèche pointillée qui fait un angle de 33° avec le Sud).

- Représentez approximativement le trajet du soleil dans le ciel pour le jour de l'équinoxe du printemps ($n = 81$) dans la figure de la page suivante. (1 pt)
- Calculez la position du soleil (θ_z et γ_s) à 17 h (temps civil), pour le même jour ($n = 81$). Notez que Montréal utilise le fuseau horaire UTC-5 et que l'heure d'été est en application le jour de l'équinoxe de printemps. L'équation du temps est donnée en annexe. (1 pt)
- Les capteurs sont soumis à un ombrage par des objets lointains. La figure de la page suivante montre l'ombrage causé par l'environnement (bâtiments, montagne), à l'exception du bâtiment hachuré qui mesure 50 m par 50 m. Ce bâtiment a une hauteur de 60 m, alors que les capteurs sont sur le toit d'un bâtiment qui a une hauteur de 10 m. Représentez schématiquement l'ombrage causé par le bâtiment hachuré sur le plan dans la figure de la page suivante, qui montre l'angle d'altitude solaire (α_s) ou l'angle d'obstruction des ombrages en fonction de l'azimut. Représentez également la position du soleil à 17 h (temps civil) et indiquez si les capteurs recevront du rayonnement direct à ce moment. (2 pt)



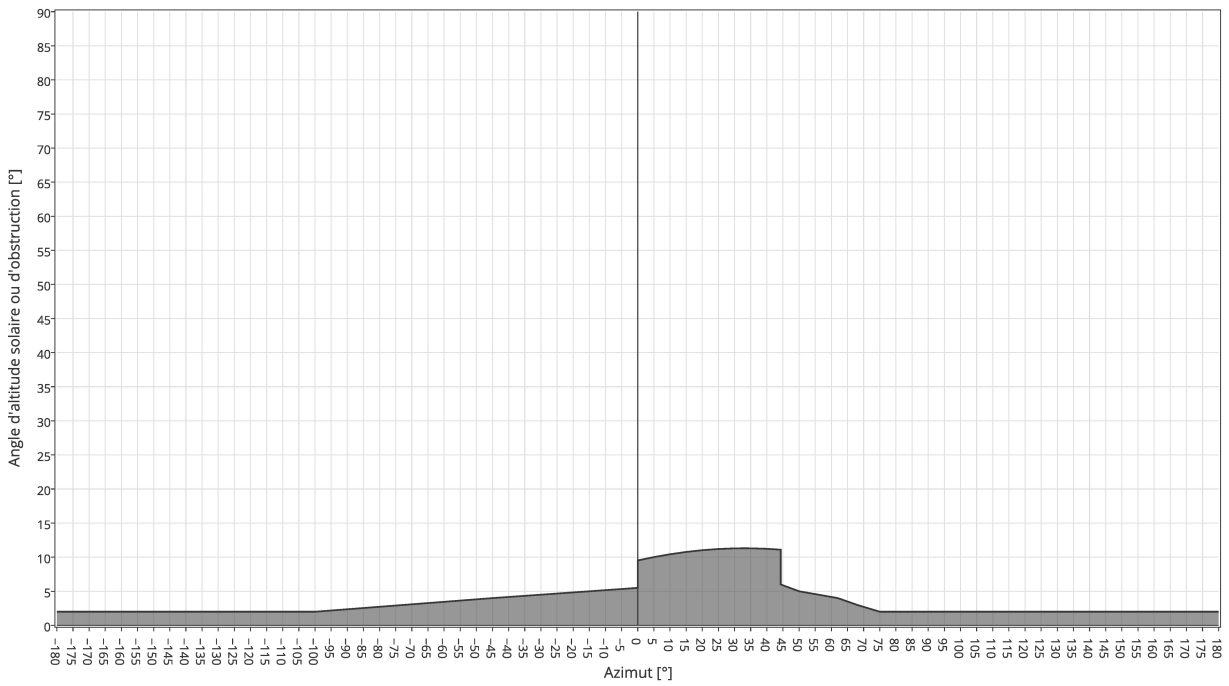
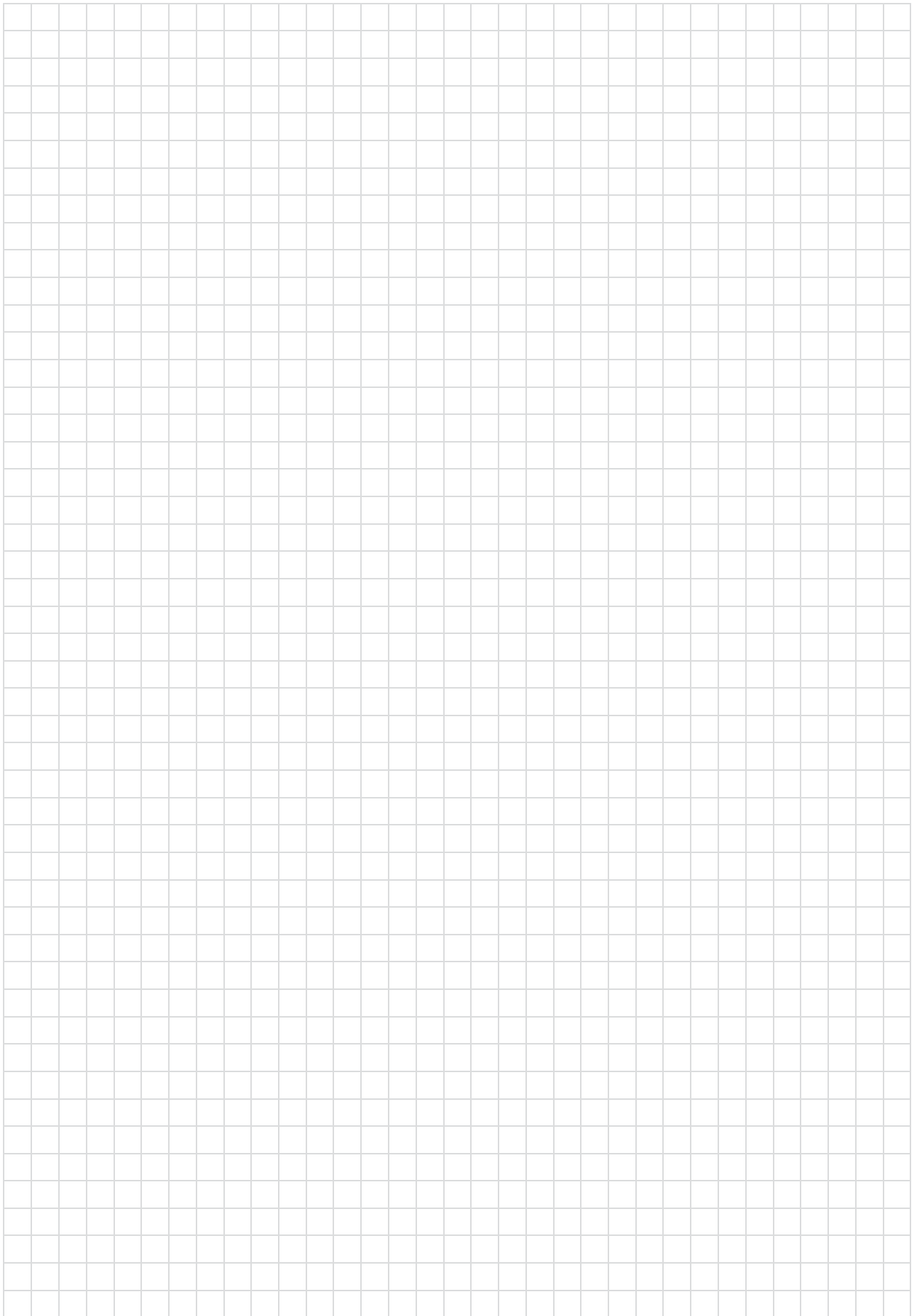


Figure 1.b. Représentation de la voûte céleste (x = azimut, y = élévation)
Ajoutez le trajet du soleil et l'ombrage causé par le bâtiment hachuré sur la figure précédente





Question 2 (4 points)

La figure ci-dessous montre un système classique de chauffage de l'eau domestique (réservoir avec résistance électrique immergée) ainsi qu'un système alternatif qui utilise l'énergie solaire en plus de la résistance électrique. On suppose que les deux systèmes fournissent la même énergie utile à l'eau chaude et que la consommation d'eau chaude est la même dans les deux cas. La figure donne les valeurs annuelles de différentes quantités d'énergie en kWh. Ces quantités sont les suivantes :

- Q_{inc} : Énergie solaire incidente sur les capteurs
- $Q_{lp,sup}$ et $Q_{lp,ret}$: respectivement pertes thermiques des tuyaux d'alimentation et de retour des capteurs
- $Q_{el,pump}$: énergie électrique consommée par la pompe (note : on suppose que cette énergie se retrouve intégralement sous forme de chaleur dans le circuit de circulation solaire)
- $Q_{el,aux}$: énergie électrique consommée par la résistance de chauffage (et transmise intégralement au réservoir sous forme de chaleur)
- Q_{ltank} : pertes thermiques du réservoir d'eau chaude (note : on suppose qu'on peut négliger la variation d'énergie interne du réservoir entre l'état initial et l'état à la fin de l'année)

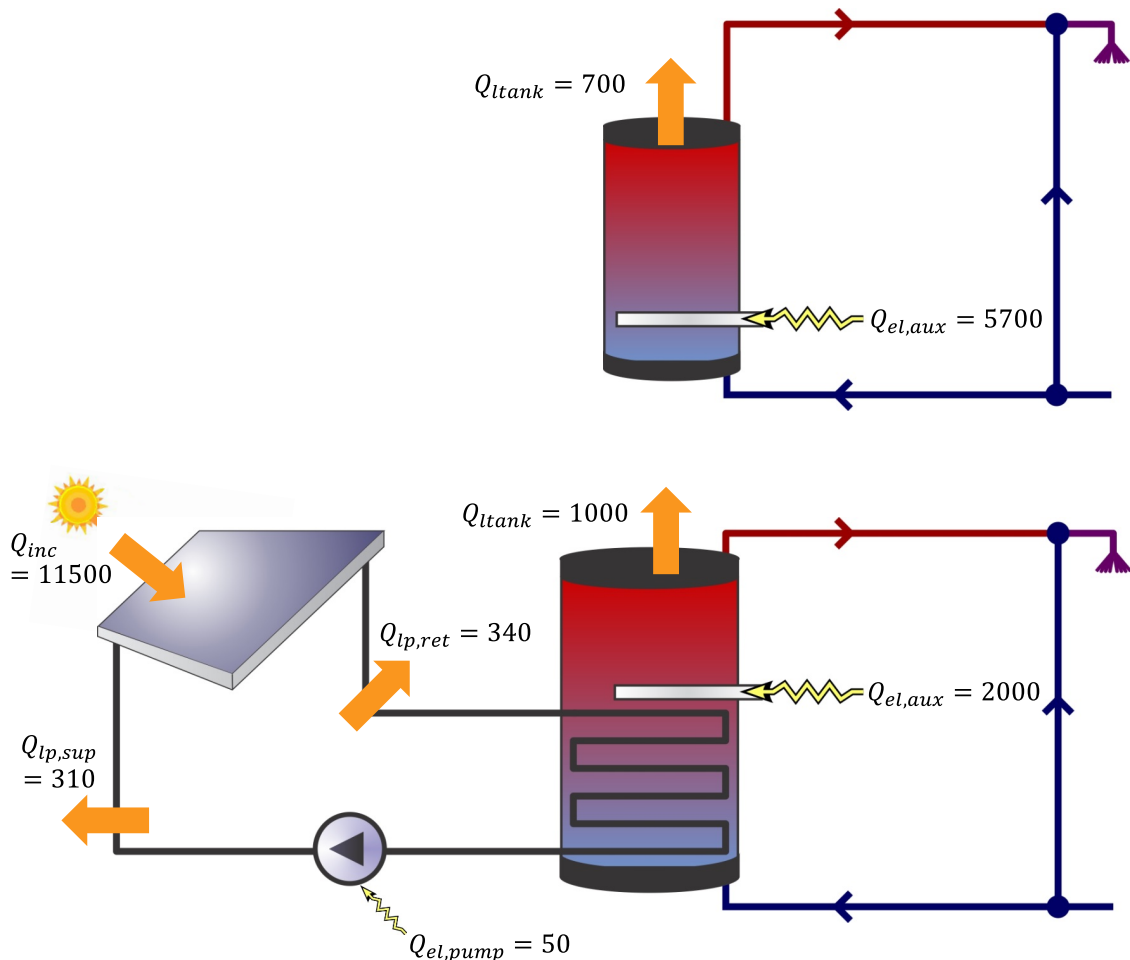
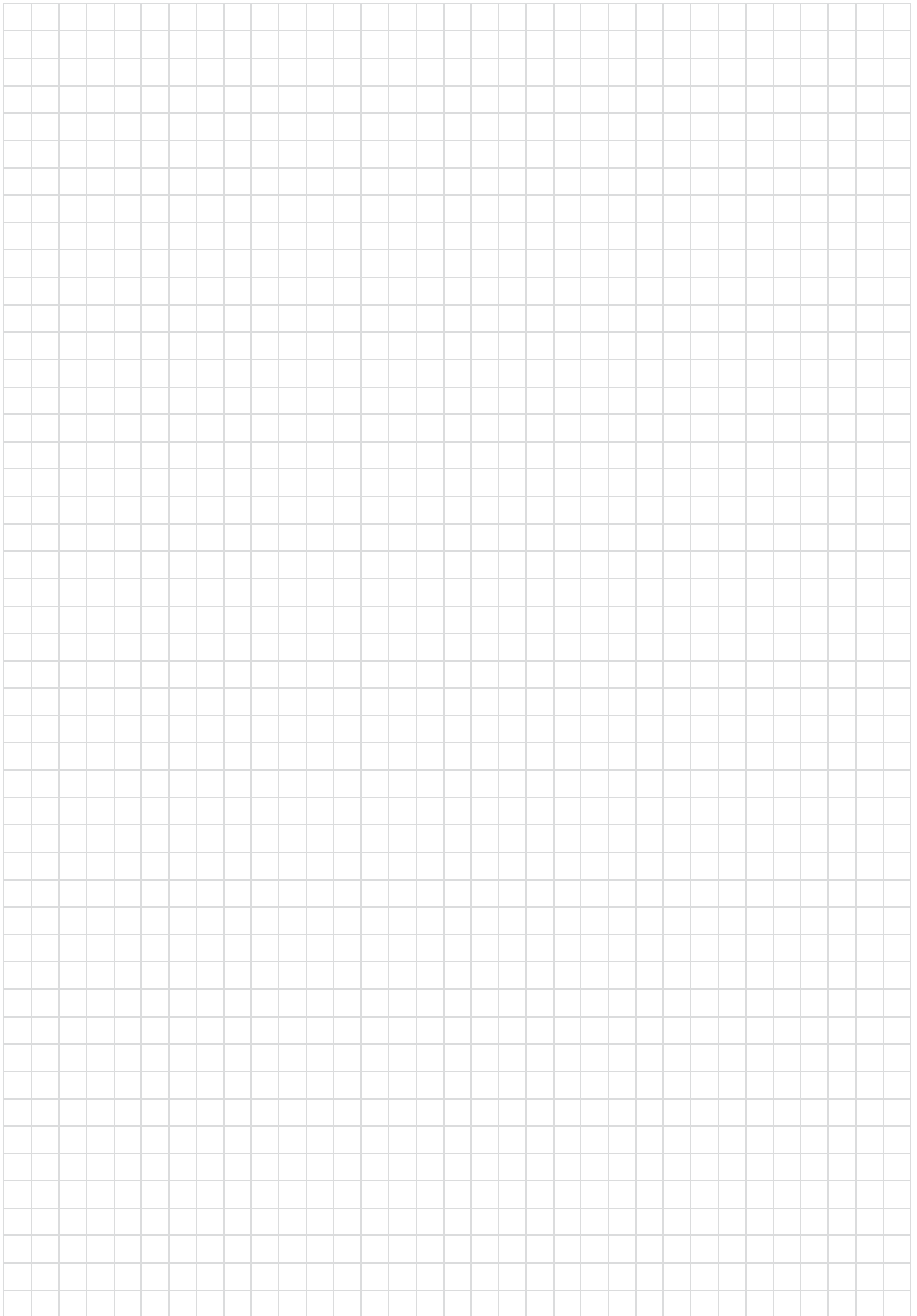


Figure 2 : bilan annuel d'un système solaire (en bas) et d'un système de référence (en haut)
 On suppose que l'énergie utile fournie à l'eau chaude est la même dans les 2 systèmes
 Toutes les quantités d'énergie sont en kWh

- a. Calculez le rendement annuel des capteurs solaires **(2 pt)**
- b. Un manufacturier utilise les résultats de la figure ci-dessus pour annoncer une fraction solaire de 92 %. Expliquez comment cette valeur est obtenue. Discutez de la pertinence de cet indicateur de performance, et proposez un autre indice de performance qui donnerait à un acheteur potentiel une meilleure idée des économies d'énergie que permettrait un système solaire. Expliquez la définition de votre indice de performance, calculez sa valeur dans le cas de la figure ci-dessus, et justifiez pourquoi il est plus pertinent que la fraction solaire qui donnerait 92 %. **(2 pt)**





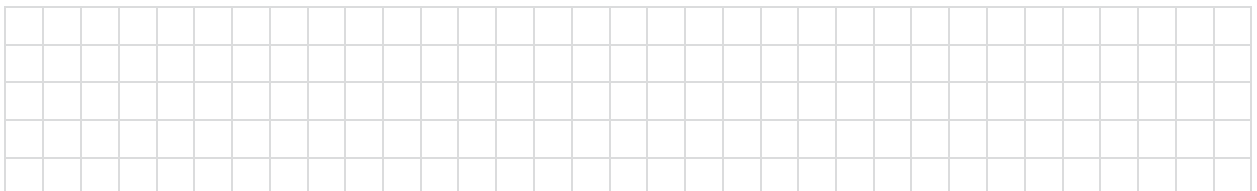
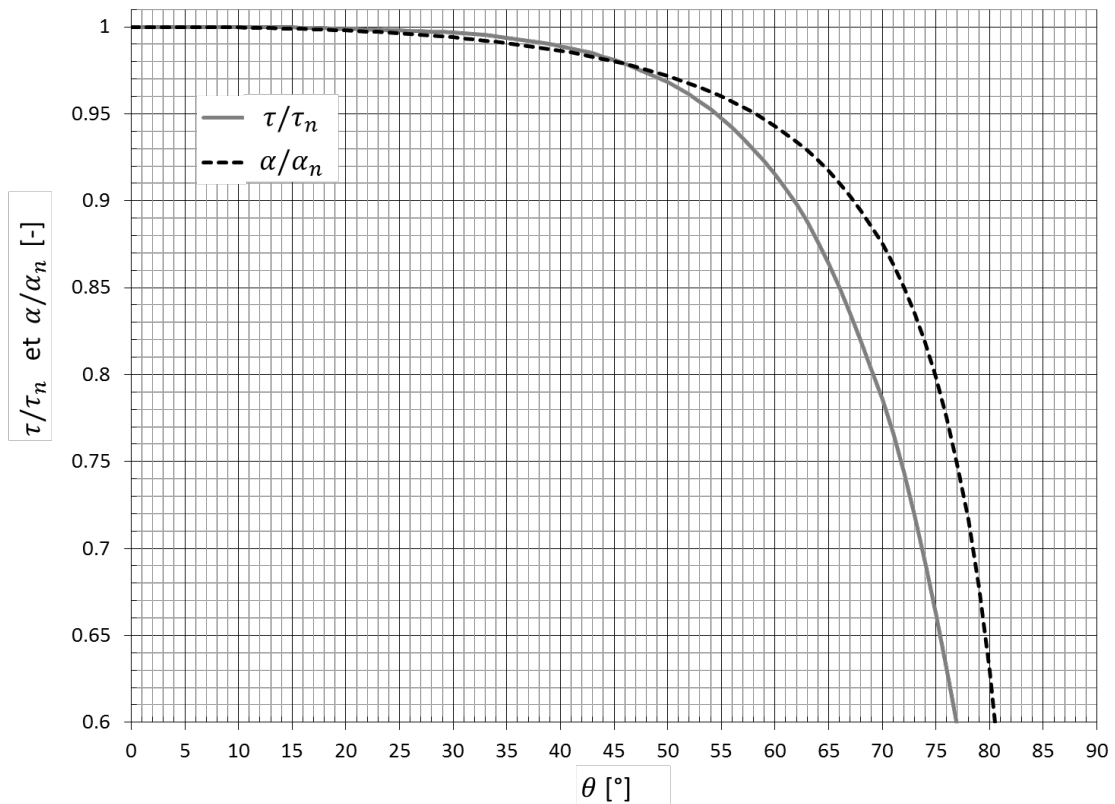
Question 3 (4 points)

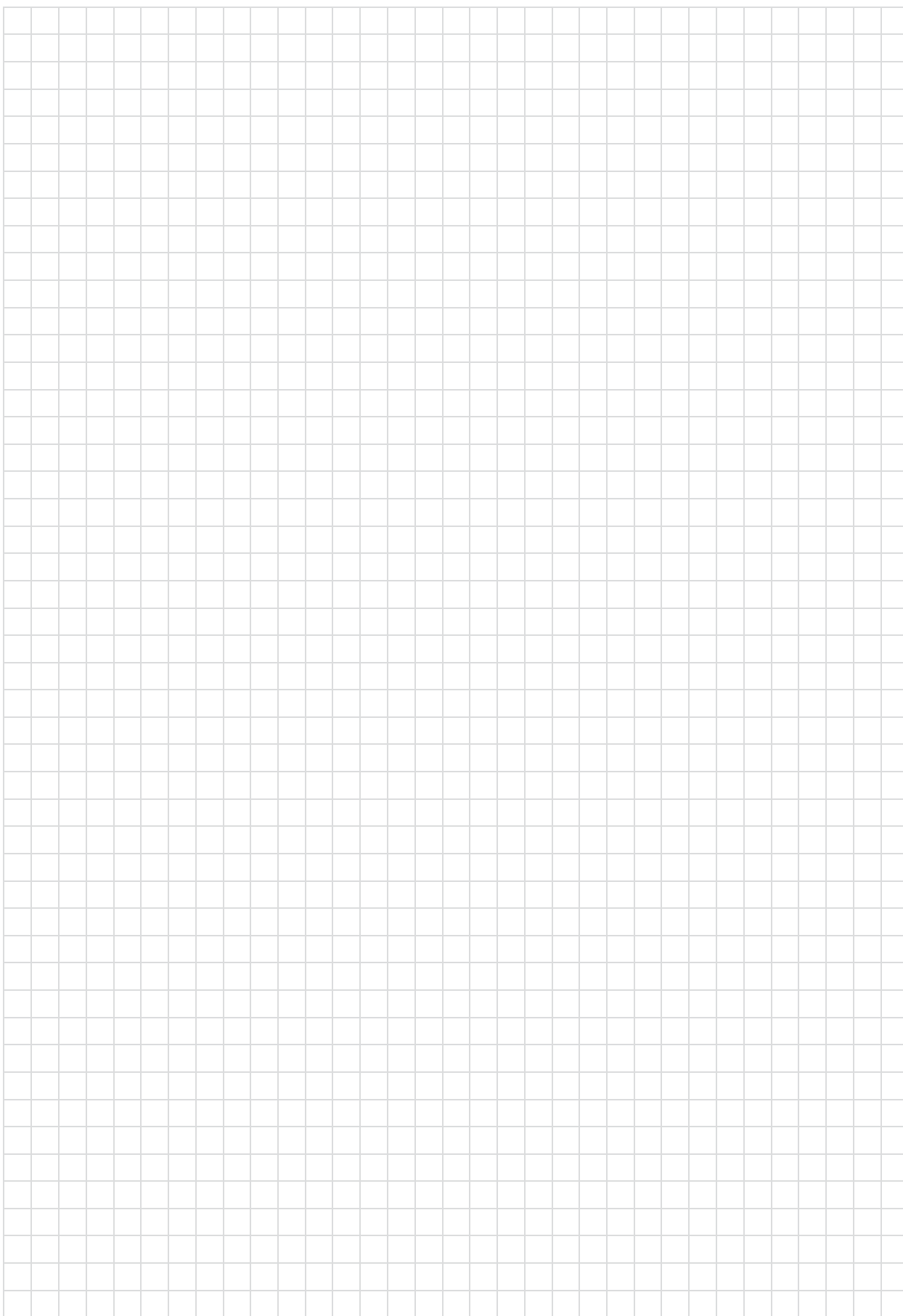
On considère le rayonnement incident sur un capteur solaire plan installé verticalement ($\beta = 90^\circ$), face au sud ($\gamma = 0^\circ$), à Montréal. À ce moment, le soleil est à une altitude $\alpha_s = 65^\circ$ et un azimut $\gamma_s = 0^\circ$. Le rayonnement direct normal (G_{bn}) est égal à 800 W/m^2 , et le rayonnement total horizontal (G) vaut 920 W/m^2 . L'albédo du sol (ρ_g) est de 0.2. On connaît également les résultats du modèle non-isotrope de Perez pour la projection du rayonnement diffus sur le mur. Le rayonnement diffus (G_{dt}) est réparti comme suit :

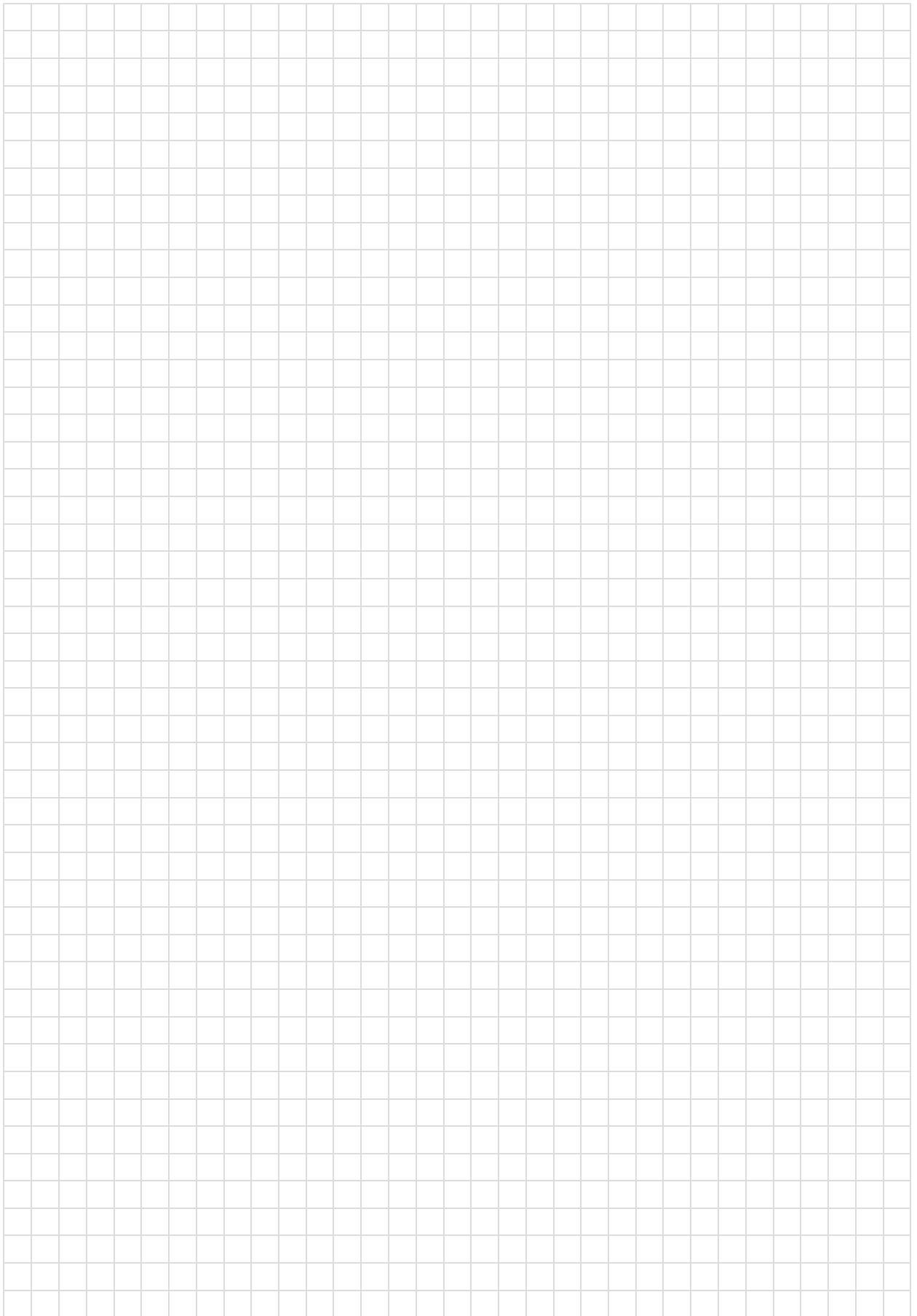
- Partie circumsolaire ($G_{dt,circumsolar}$) : 60 W/m^2
- Partie isotrope du dôme céleste ($G_{dt,sky dome}$) : 35 W/m^2
- Partie du cercle d'horizon ($G_{dt,horizon brightening}$) : 25 W/m^2

Le capteur a une couverture vitrée dont la transmittance pour le rayonnement solaire à incidence normale τ_n vaut 91 %. L'absorptance de la plaque (absorbeur) pour le rayonnement solaire à une incidence normale α_n est 0.95. La dépendance angulaire de τ et de α pour cette couverture vitrée et pour cet absorbeur est donnée à la figure ci-dessous (sous la forme normalisée, respectivement τ/τ_n et α/α_n en fonction de θ).

Calculez le rayonnement total absorbé par le capteur (S), en W/m^2 . (4 pt)

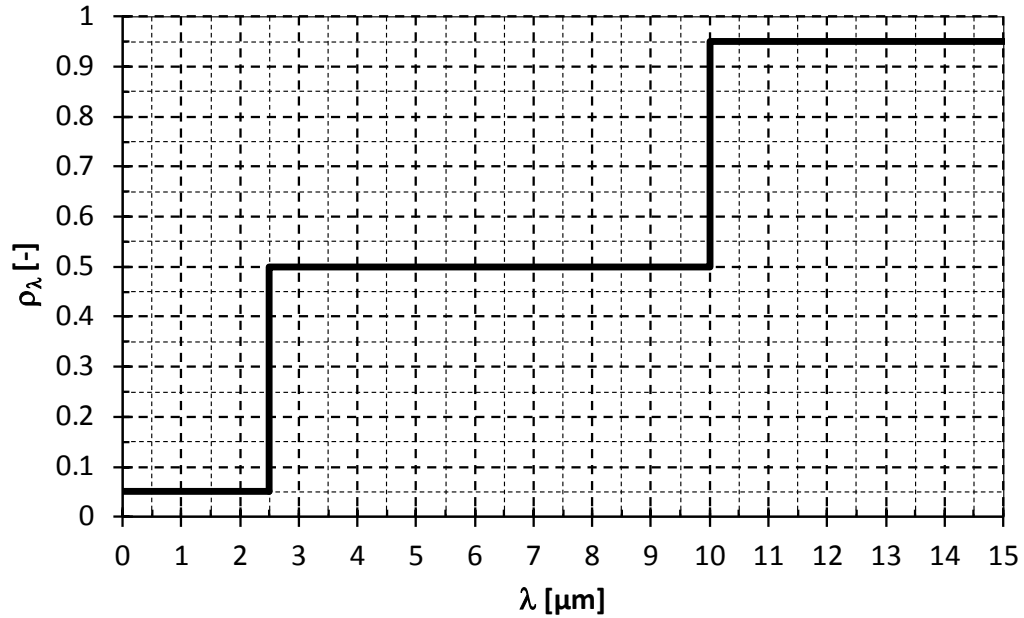




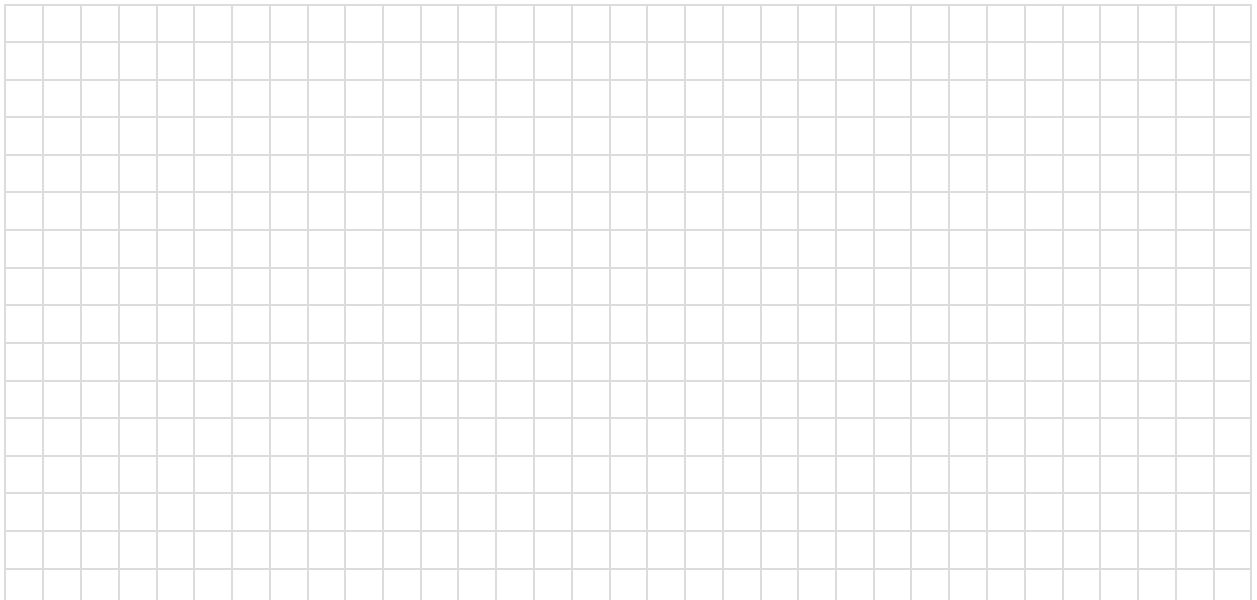


Question 4 (4 points)

La figure ci-dessous donne le coefficient de réflexion monochromatique ρ_λ d'une surface en fonction de la longueur d'onde λ . On peut extrapoler la valeur finale ($\rho_\lambda = 0.95$ pour $\lambda > 15\mu\text{m}$).



- Calculez l'absorptance solaire totale de la surface en utilisant la distribution spectrale du rayonnement solaire pour AM 1.5 (voir information supplémentaire en annexe). **(1.5 pt)**
- Calculez l'émittance totale ε de la surface, en supposant qu'elle est à une température de 400 K. La distribution spectrale du rayonnement des corps noirs est également fournie en annexe. **(1.5 pt)**
- Représentez schématiquement l'évolution de l'émittance totale ε de la surface en fonction de la température, entre 300 K et 700 K. **(1 pt)**





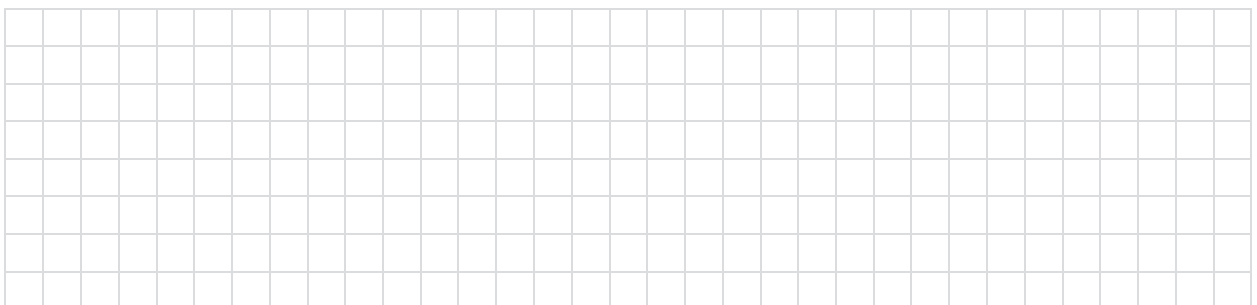
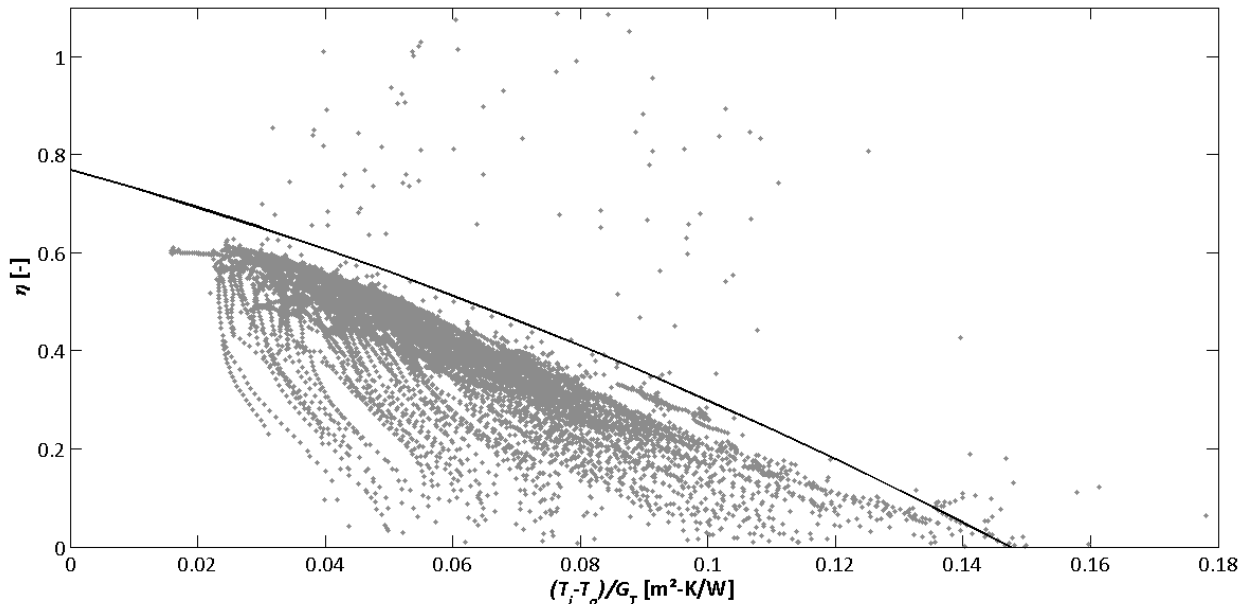
Question 5 (4 points)

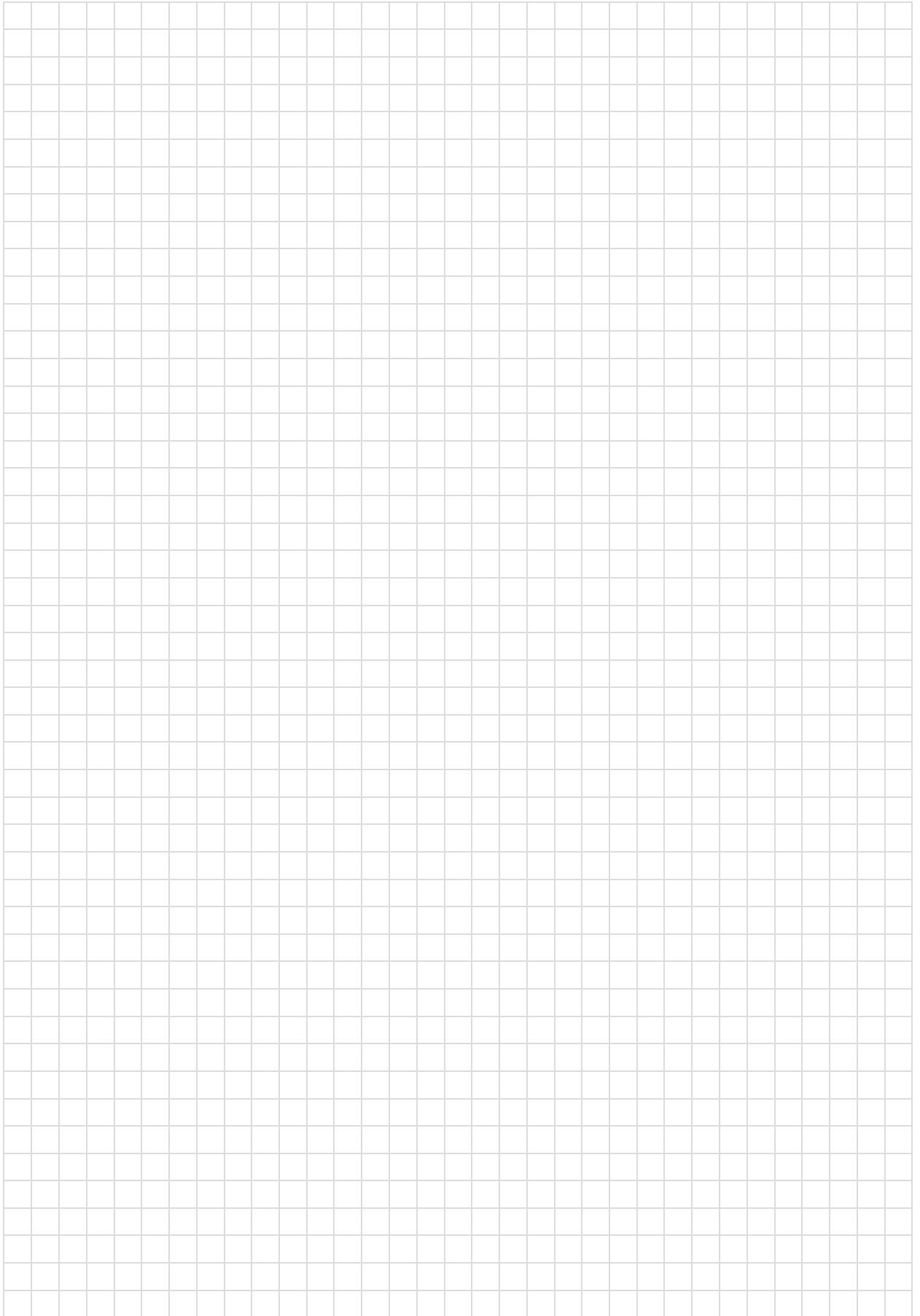
Un extrait de rapport de test de capteur solaire par le SRCC (certification OG100) est donné en annexe. Le rendement du capteur est donné comme une équation du type :

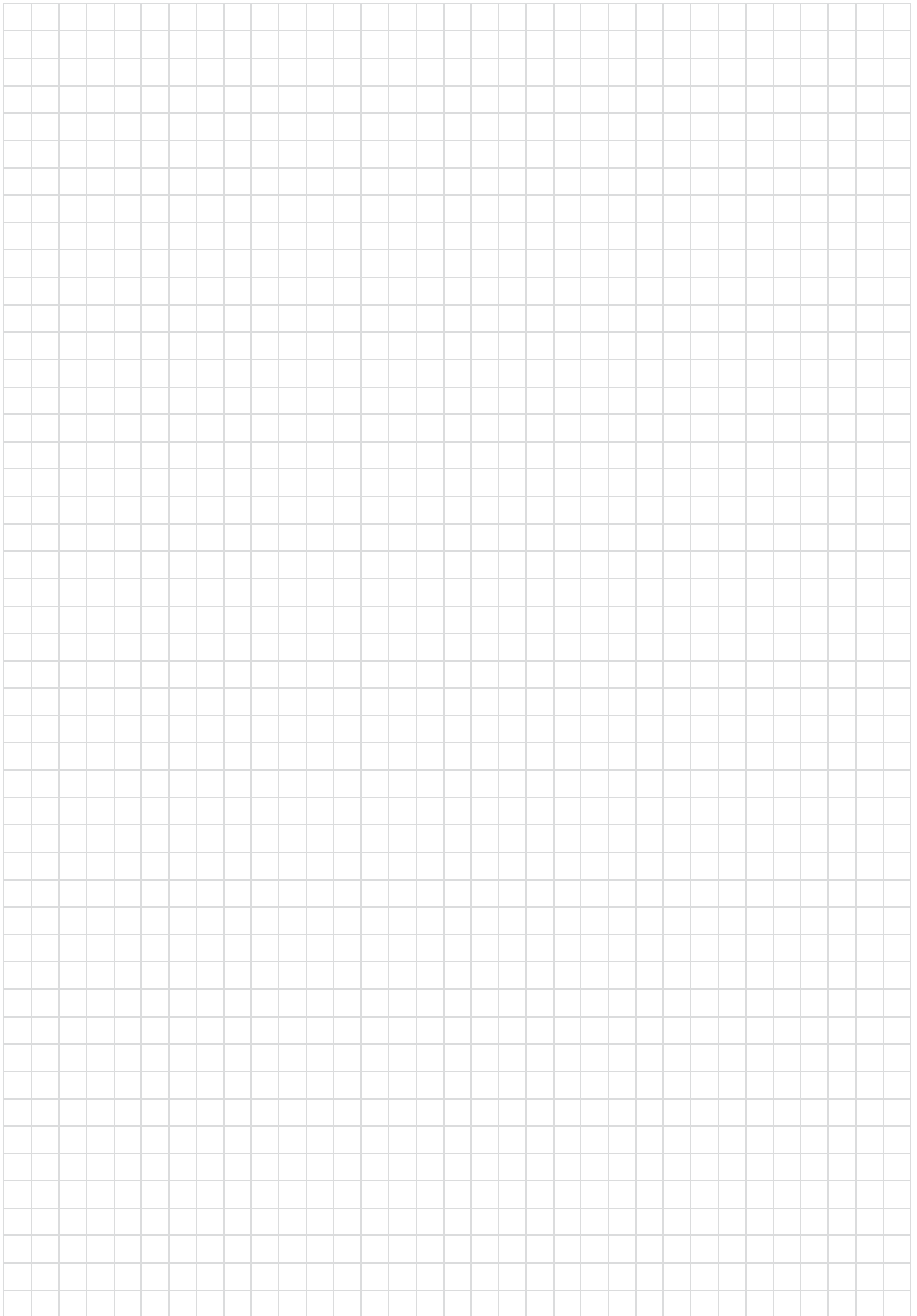
$$\eta = a_0 - a_1(T_i - T_a)/G_t - a_2(T_i - T_a)^2/G_t \quad (\text{dans la nomenclature SRCC, } (T_i - T_a) \text{ est } P \text{ et } G_t \text{ est } I)$$

- Expliquez le sens physique des paramètres de performance a_0 , a_1 , et a_2 en les exprimant à l'aide de paramètres des capteurs solaires vus au cours. En particulier, où interviennent les paramètres $(\tau\alpha)$, F_R , U_L ? Quels sont les principaux paramètres de design et d'opération des capteurs et quelle est leur influence sur les paramètres a_0 , a_1 et a_2 ? **(2 pt)**
- La Figure ci-dessous représente les résultats d'une simulation TRNSYS avec le capteur dont la fiche de performance SRCC figure en annexe. Le modèle est le Type 539 des bibliothèques TESS que vous avez utilisé pour les devoirs. Le système modélisé est un système classique pour l'eau chaude domestique avec un appoint intégré au réservoir de stockage. La pompe solaire est commandée par un régulateur On/Off et lorsqu'elle est en fonctionnement, le débit est constant et égal au débit de test des capteurs, et le fluide est du propylène glycol à 50 %. La Figure superpose la courbe de rendement théorique pour $G_T = 800 \text{ W/m}^2$ avec les points calculés pendant la simulation pour le mois de juin (chaque point représente un pas de temps de 3 min). Le rendement est calculé avec la superficie brute.

Pourquoi les points ne sont-ils pas tous sur la courbe théorique ? Donnez 3 raisons possibles et expliquez la forme du nuage de points. **(2 pt)**







Informations supplémentaires

Équation du temps

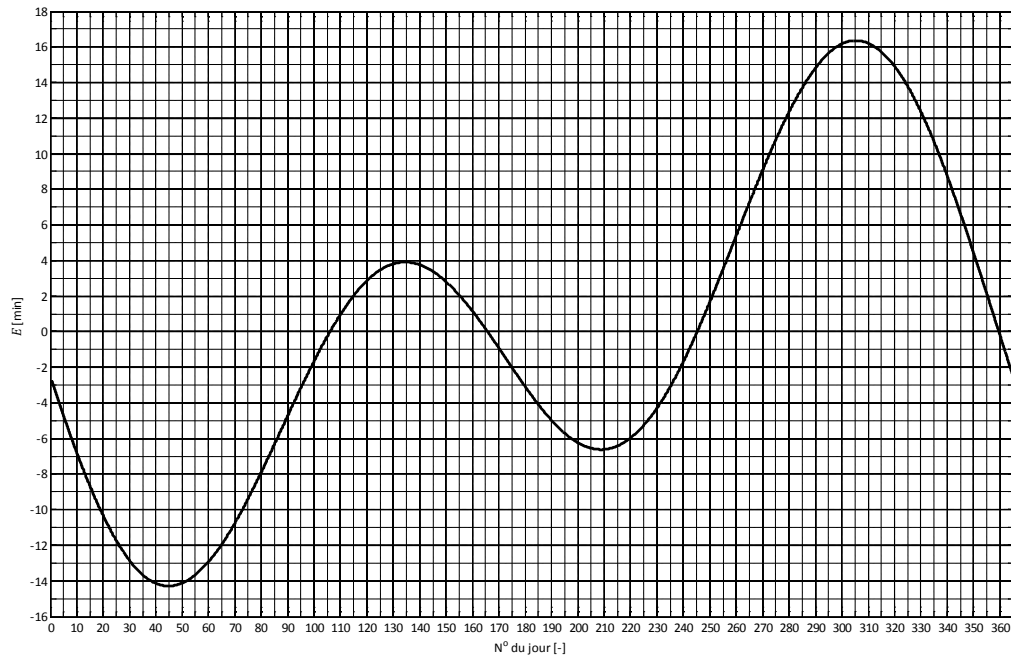


Figure 1.5.1 – Équation du temps E en minutes en fonction du jour de l'année

Distribution spectrale du rayonnement solaire terrestre (AM 1.5)

Note : la table ci-dessous présente les mêmes données que la Table 2.6.1 mais sous une forme différente (incrément de λ au lieu d'incrément de $f_{0-\lambda}$)

Fraction de l'énergie incidente entre 0 et λ pour le spectre de référence du rayonnement solaire AM 1.5 (ASTM G173-03)

λ [μm]	$f_{0-\lambda}$ [-]	λ [μm]	$f_{0-\lambda}$ [-]	λ [μm]	$f_{0-\lambda}$ [-]
0.300	0.0000	1.100	0.8043	1.900	0.9600
0.350	0.0138	1.150	0.8162	1.950	0.9601
0.400	0.0461	1.200	0.8358	2.000	0.9628
0.450	0.1078	1.250	0.8584	2.050	0.9659
0.500	0.1856	1.300	0.8788	2.100	0.9697
0.550	0.2620	1.350	0.8907	2.150	0.9741
0.600	0.3366	1.400	0.8908	2.200	0.9781
0.650	0.4086	1.450	0.8920	2.250	0.9819
0.700	0.4758	1.500	0.8977	2.300	0.9851
0.750	0.5358	1.550	0.9105	2.350	0.9879
0.800	0.5889	1.600	0.9232	2.400	0.9900
0.850	0.6376	1.650	0.9347	2.450	0.9915
0.900	0.6834	1.700	0.9453	2.500	0.9922
0.950	0.7100	1.750	0.9542	3.000	0.9927
1.000	0.7397	1.800	0.9598	3.500	0.9955
1.050	0.7744	1.850	0.9600	4.000	1.0000

Distribution spectrale du rayonnement des corps noirs

Table 3.6.1a – Fraction de l'énergie radiative émise par un corps noir entre 0 et λT pour des incréments de λT

λT [$\mu\text{m K}$]	$f_{0-\lambda T}$ [-]	λT [$\mu\text{m K}$]	$f_{0-\lambda T}$ [-]	λT [$\mu\text{m K}$]	$f_{0-\lambda T}$ [-]
1000	0.0003	4500	0.5643	8000	0.8564
1100	0.0009	4600	0.5793	8100	0.8603
1200	0.0021	4700	0.5937	8200	0.8641
1300	0.0043	4800	0.6076	8300	0.8677
1400	0.0078	4900	0.6209	8400	0.8713
1500	0.0129	5000	0.6338	8500	0.8748
1600	0.0197	5100	0.6460	8600	0.8781
1700	0.0285	5200	0.6580	8700	0.8812
1800	0.0393	5300	0.6694	8800	0.8843
1900	0.0521	5400	0.6804	8900	0.8873
2000	0.0667	5500	0.6909	9000	0.8901
2100	0.0831	5600	0.7011	9100	0.8929
2200	0.1009	5700	0.7108	9200	0.8956
2300	0.1200	5800	0.7202	9300	0.8983
2400	0.1403	5900	0.7292	9400	0.9008
2500	0.1613	6000	0.7379	9500	0.9032
2600	0.1831	6100	0.7462	9600	0.9055
2700	0.2053	6200	0.7542	9700	0.9078
2800	0.2279	6300	0.7619	9800	0.9100
2900	0.2505	6400	0.7693	9900	0.9123
3000	0.2732	6500	0.7764	10000	0.9144
3100	0.2957	6600	0.7833	11000	0.9321
3200	0.3181	6700	0.7898	12000	0.9452
3300	0.3401	6800	0.7962	13000	0.9552
3400	0.3618	6900	0.8023	14000	0.9630
3500	0.3829	7000	0.8082	15000	0.9691
3600	0.4036	7100	0.8139	16000	0.9739
3700	0.4238	7200	0.8193	17000	0.9778
3800	0.4434	7300	0.8245	18000	0.9810
3900	0.4624	7400	0.8296	19000	0.9836
4000	0.4809	7500	0.8345	20000	0.9857
4100	0.4988	7600	0.8392	30000	0.9954
4200	0.5160	7700	0.8437	40000	0.9981
4300	0.5327	7800	0.8481	50000	0.9991
4400	0.5488	7900	0.8523	∞	1.0000

Angle d'incidence équivalent pour le rayonnement diffus et réfléchi

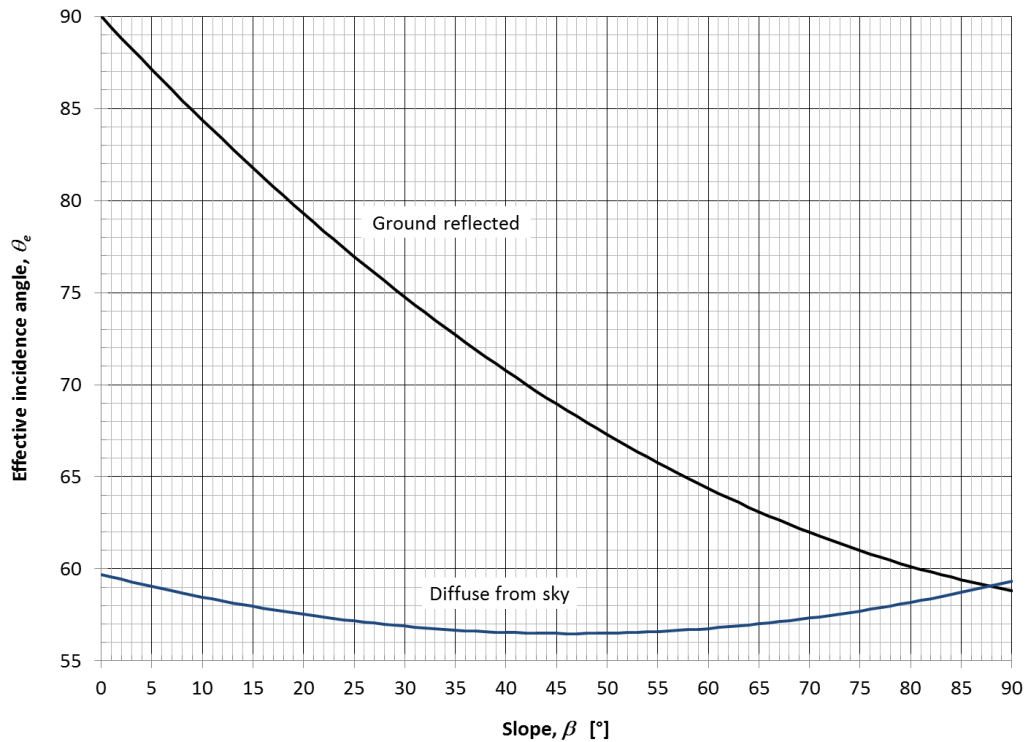


Figure 5.4.1 – Angle d'incidence effectif pour le rayonnement diffus isotrope et pour le rayonnement réfléchi par le sol sur des surfaces inclinées de pente β

Extrait de la fiche « SRCC » du capteur utilisé pour la Question 5

COLLECTOR SPECIFICATIONS

Gross Area: 2.494 m² 26.84 ft² Net Aperture Area: 2.34 m² 25.13 ft²
 Dry Weight: 42.2 kg 93. lb Fluid Capacity: 1.7 liter 0.4 gal
 Test Pressure: 1103. KPa 160. psig

COLLECTOR MATERIALS

Frame: Aluminum
 Cover (Outer): Low Iron Tempered Glass
 Cover (Inner): None

Pressure Drop

Flow		ΔP	
ml/s	gpm	Pa	in H ₂ O
20.00	0.32	9846.00	39.57
50.00	0.79	36448.0	146.5
80.00	1.27	77248.00	310.46

Absorber Material: Tube - Copper / Plate - Copper Sheet

Insulation Side: None

Absorber Coating: Black Chrome

Insulation Back: Mineral Fibre

TECHNICAL INFORMATION

Efficiency Equation [NOTE: Based on gross area and (P)=T_i-T_a]

	SI Units:	IP Units:	Y INTERCEPT	SLOPE
	$\eta = 0.769 - 3.61400 (P)/l - 0.01358 (P)^2/l$	$\eta = 0.769 - 0.63661 (P)/l - 0.00133 (P)^2/l$	0.776	-4.427 W/m ² .°C
			0.776	-0.780 Btu/hr.ft ² .°F

Incident Angle Modifier [(S)=1/cosθ - 1, 0°<θ<=60°]

K_{τα} = 1 -0.100 (S) -0.215 (S)²
 K_{τα} = 1 -0.32 (S) Linear Fit

Test Fluid: Water
 Test Flow Rate: 20.0 ml/s.m² 0.0295 gpm/ft²