

PARTIE 2 – Étude thermique du bâtiment pédagogique
(7 points)

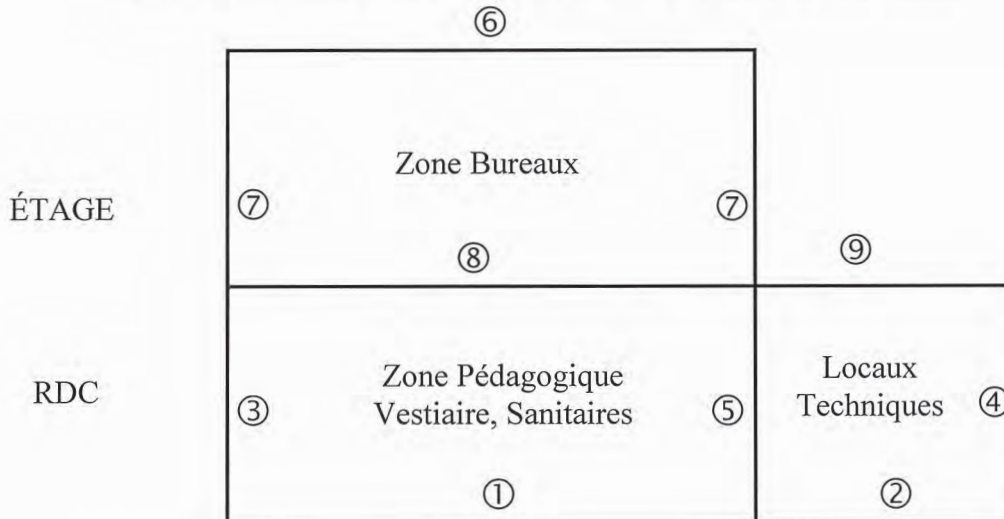
Les études 1, 2 et 3 sont indépendantes.

L'objectif de cette partie est d'étudier les performances thermiques d'une partie du bâtiment de bureaux et espace pédagogique du pôle de valorisation des déchets, afin de comparer différents choix techniques et de constater leurs influences sur le comportement thermique du bâtiment.

Ce bâtiment comporte :

- au rez-de-chaussée : une zone pédagogique, des vestiaires et sanitaires chauffés et des locaux techniques non chauffés (hors volume isolé)
- à l'étage une zone de bureaux chauffée en continu la journée (de 8h à 20h du lundi au vendredi) accessible par un escalier extérieur.

Coupe simplifiée du bâtiment étudié et repérage des parois:



Les températures des différentes zones sont les suivantes :

Zone	Température intérieure en période d'occupation	Température intérieure en période d'inoccupation
RDC-Zone Locaux Techniques (LT)	Non chauffé	Non chauffé
RDC-Zone Pédagogique, vestiaires, sanitaires (ZP)	19 [°C]	15 [°C] (la nuit ou le week-end)
Étage-Zone Bureaux (ZB)	19 [°C]	15 [°C] (la nuit ou le week-end)

L'ensemble du bâtiment est à ossature bois isolée, avec de la ouate de cellulose, seul le plancher bas est lourd (dalle de béton de 15 [cm] avec isolation polyuréthane TMS).

ÉTUDE 1 : Influence du choix des vitrages

L'objectif de cette partie est d'étudier la performance thermique de différents doubles vitrages afin de faire un choix judicieux pour le bâtiment. Les calculs seront établis pour une surface de 1 [m²] de paroi vitrée.

Le vitrage de référence est un double vitrage 6.16.6 avec deux vitres de 6 [mm] d'épaisseur emprisonnant une lame d'air de 16 [mm].

Hypothèses :

- Dans les conditions de base, on considèrera que les faces internes des vitres ont pour températures respectives $\theta_1 = 15$ [°C] et $\theta_2 = 5$ [°C].
- Étude en régime permanent
- Les surfaces sont grises vis à vis du rayonnement

Données :

- Les échanges de chaleur au sein de la lame d'air se font par :

- conduction suivant la loi de Fourier pour $Ra_e < 6.10^3$
- convection pour $Ra_e \geq 6.10^3$. Dans ce cas on a :
$$Nu = 1 + 1,89.10^{-4} (L/e)^{-0,75} \cdot Gr_e \text{ pour } Gr_e < 1,32.10^3 (L/e)^{0,75}$$
$$Nu = 0,114.(L/e)^{-0,25} \cdot Gr_e^{-0,25} \text{ pour } Gr_e > 1,32.10^3.(L/e)^{0,75}$$

Avec L : hauteur du vitrage en [m] et e : distance entre les 2 vitres en [m]

- rayonnement en assimilant les vitrages à des corps gris

- Rayonnement :

- Facteur radiatif (échange entre deux surfaces) :

$$\frac{1}{F_{ij}} = \left(\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) + \frac{1}{F_{ij}} + \frac{S_i}{S_j} \left(\frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right)$$

Avec F_{ij} : facteur de forme entre S_i et S_j et ε : émissivité

- Constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67.10^{-8}$ [W/m².K⁴]

- Les corrélations utiles pour les calculs de convection sont rappelées ci-dessous :

- Nombre de Nusselt : $Nu = \frac{hc \cdot X}{\lambda}$

- Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda}$

- Nombre de Grashof : $Gr_x = \left(\frac{\rho^2 \cdot g \cdot \beta}{\mu^2} \right) \cdot X^3 \cdot \Delta\theta$

- Nombre de Rayleigh : $Ra_x = Gr_x \cdot Pr$

Avec : X : Longueur caractéristique de la géométrie en [m]

β : Coefficient de dilatation isobare du fluide : $\beta = 1/T$, T étant la température de la couche limite.

$g = 9,81$ [m/s²]

Propriétés de l'air sec à la pression atmosphérique

θ	C_p	ρ	$\mu (10^{-5})$	$\nu (10^{-6})$	λ
[°C]	[J/kg.K]	[kg/m ³]	[Pa.s]	[m ² /s]	[W/m.K]
-20	1006	1,3944	1,620	11,62	0,0225
-10	1006	1,3414	1,671	12,46	0,0233
0	1006	1,2923	1,72	13,31	0,0241
10	1006	1,2467	1,769	14,19	0,0249
20	1006	1,2042	1,817	15,09	0,0256
30	1006	1,1644	1,865	16,02	0,0264
40	1007	1,1273	1,911	16,95	0,0271
50	1007	1,0924	1,957	17,91	0,0278

Propriétés du verre à vitre

$$\lambda = 1 \text{ [W/m.K]} ; \rho = 2500 \text{ [kg/m}^3\text{]} ; C_p = 750 \text{ [J/kg.K]}$$

Résistances thermiques superficielles conventionnelles pour une paroi verticale :

$$R_{si} + R_{se} = 0,17 \text{ [m}^2\text{.KW]}$$

Travail demandé

I. ÉTUDE THERMIQUE

Question 7 : Représenter schématiquement le vitrage, et expliquer quels sont les transferts de chaleur à prendre en compte pour le calcul du coefficient de transmission thermique global.

Question 8 : Donner l'expression de la densité de flux net radiatif φ_{r12} échangé au sein de la lame d'air entre les 2 faces du vitrage. En déduire l'expression exacte et approchée du coefficient d'échanges radiatifs noté h_{r12} , tel que $\varphi_{r12} = h_{r12} \cdot (T_1 - T_2)$.

Question 9 : Calculer les facteurs radiatifs \mathcal{F}_{12} et les coefficients h_{r12} dans les 3 cas suivants :

- verre ordinaire ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,92$)
- une des deux faces peu émissive ($\varepsilon_1 = 0,13$ et $\varepsilon_2 = 0,92$)
- deux faces peu émissives ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,13$)

Comparer et commenter les résultats obtenus.

Question 10 : Calculer l'épaisseur de lame d'air e_0 à partir de laquelle la convection devient prépondérante devant la conduction. Conclure sur les échanges à considérer au sein de la lame d'air pour le vitrage de référence.

Question 11 : À partir des résultats précédents, calculer la résistance thermique totale ainsi que le coefficient de transmission surfacique global U_g du double vitrage dans les 3 cas de verres étudiés. Pour cela on considèrera les valeurs des résistances superficielles R_{si} et R_{se} conventionnelles.

II. ECONOMIES D'ENERGIE

La zone Bureaux comporte 24 [m²] de double vitrage (6.16.6, remplissage argon) dont le coefficient Uw de référence (vitrage + menuiserie) est de 1,17 [W/m².K].

Données supplémentaires :

- Propriétés de l'argon à 10°C:

$$\lambda = 0,01684 \text{ [W/m.K] ; } \rho = 1,699 \text{ [kg/m}^3\text{] ; } C_p = 519 \text{ [J/kg.K]}$$

- Température intérieure : 19 [°C]

- Température extérieure : -6 [°C]

- Degrés Jours Unifiés du site base 18 [°C] (du 1^{er} Octobre au 20 Mai):

Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai
95	211	295	308	253	249	190	112

- Facteur de couverture (contribution des apports internes et solaires aux besoins en chauffage) : F = 70 %

- Hypothèse simplificatrice: chauffage continu à 19 [°C]

Question 12 : Quel est l'avantage d'une lame d'argon par rapport à une lame d'air ? Justifier votre réponse.

Question 13 : Un autre type de vitrage (Uw = 1,36 [W/m².K]) est envisagé pour cette zone. Quelle économie annuelle sur les besoins en chauffage peut-on espérer avec le vitrage de référence, par rapport à cette autre solution ? Exprimer le résultat en [kWh/an].

Question 14 : Quels sont les autres critères de choix d'un vitrage ? Justifier votre réponse.

III. ANALYSE DE L'ETUDE THERMIQUE DYNAMIQUE

Le rapport d'analyse par simulation thermique dynamique a permis de comparer trois types de vitrages. La majorité des vitrages de chaque zone est orientée plein Sud.

Question 15 : Analyser les résultats obtenus ci-dessous en termes de confort d'hiver et d'été pour les différentes zones du bâtiment.

Tableau n°1 : Performance des vitrages étudiés

Modèle de fenêtre		Ratio vitrage	Facteur Solaire vitrage	Coeff Ug [W/m ² .K]	Coeff Uf [W/m ² .K]	Coeff Uw [W/m ² .K]	Facteur solaire moyen g
1	Double vitrage 6.16.6 argon	95	0,60	1,10	2,40	1,17	0,57
2	Double vitrage 6.12.6 argon	95	0,53	1,30	2,40	1,36	0,50
3	Double vitrage 6.16.6 argon (protection solaire renforcée)	95	0,41	1,10	2,40	1,17	0,39

Tableau n°2 : Taux d'inconfort suivant le type de vitrage

Taux d'inconfort = pourcentage du temps d'occupation durant lequel la température de la zone est supérieure à 27 [°C]

Zone	g=0,57	g=0,50	g=0,39
Bureaux	3,08	1,09	0
Salle réunion	5,48	2,92	0,77
Vestiaires/sanitaires	0,77	0,13	0
Salle pédagogique 1	2,24	1,09	0,16
Salle pédagogique 2	0,19	0	0

Graphe n°1 : Température de la salle de réunion pendant une semaine mi-mars en fonction du type de vitrage

- en rouge : vitrage type CLIMAPLUS N 6.16.6 argon, avec g=0.57 (courbe 1)
- en bleu : vitrage 6.12.6 argon avec g=0.50 (courbe 2)
- en vert : vitrage type CLIMAPLUS 4S 6.16.6 argon, avec g=0.39 (courbe 3)

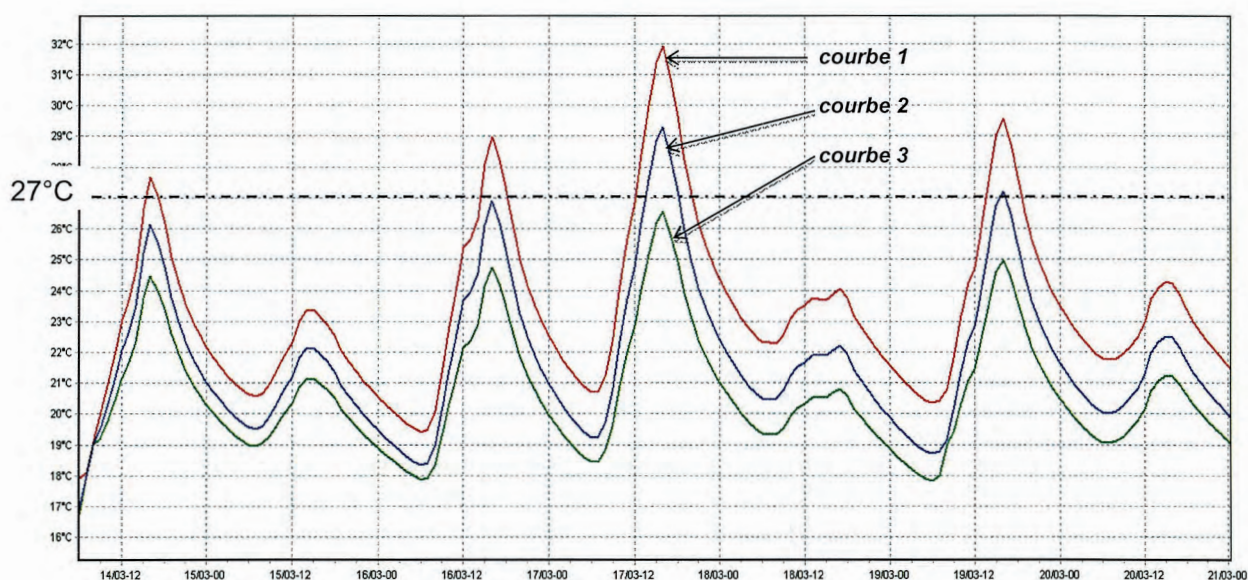


Tableau n°3 : Besoins en chauffage suivant le type de vitrages

Zone	g=0,57		g=0,50		g=0,39	
	Chauffage [kWh]	Chauffage [kWh/m ²]	Chauffage [kWh]	Chauffage [kWh/m ²]	Chauffage [kWh]	Chauffage [kWh/m ²]
Bureaux	467	13	603	17	668	19
Salle réunion	296	12	408	17	471	19
Vestiaires	104	12	132	15	158	18
Sanitaires	217	38	237	42	253	44
Salle pédagogique 1	320	16	397	20	442	22
Salle pédagogique 2	1290	17	1615	21	1815	24

ÉTUDE 2 : Influence des locaux techniques accolés

L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence des locaux techniques accolés (LT, non chauffés), sur les déperditions du bâtiment.

Données :

- Température extérieure de base : -6 [°C]
- Les coefficients de déperditions et les surfaces des différentes parois sont regroupés dans le tableau suivant :

Numéro de paroi	Type de paroi	Déperditions par les parois : H_p [W/K]	Surface [m ²]
1	Plancher bas (locaux chauffés)	26,2	109,82
2	Plancher bas LT	13,1	24,32
3	Murs extérieurs (RDC)	44,82	109,94
4	Murs extérieurs LT	18,5	37,8
5	Murs mitoyens LT	4,37	24,32
6	Toiture (Étage)	17,24	109,82
7	Murs extérieurs (Étage)	60,9	127,22
8	Plancher intermédiaire	19,7	109,82
9	Toiture LT	6,54	24,32

- Composition des murs extérieurs de l'intérieur vers l'extérieur :

- Plaque de plâtre : $e=13\text{mm}$, $\lambda=0,25$ [W/m.K]
- Vide technique (lame d'air) : $e=45$ mm, $R= 0,18$ [m².K/W]
- Pare-vapeur
- Ossature bois massif 45 x 220 mm entraxe 600 mm ($\lambda_{\text{bois}}=0,15$ [W/m.K]) avec remplissage isolation ouate de cellulose : $e=220$ mm, $\lambda=0,041$ [W/m.K]
- Contreventement OSB $e=12$ mm, $\lambda=0,13$ [W/m.K]
- Pare-pluie
- Bardage bois fortement ventilé (*non pris en compte dans le calcul*)

- Résistances thermiques superficielles conventionnelles pour une paroi verticale :

$$R_{si} = 0,13 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]} \text{ et } R_{se} = 0,04 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]}$$

Hypothèses :

- La température du sol est à la température extérieure
- Le régime est permanent

Travail demandé

Question 16 : Calculer la résistance thermique et le coefficient U des murs extérieurs. Pour sa partie mitoyenne avec les locaux techniques, faut-il revoir la valeur du coefficient U ? Justifier votre réponse.

Question 17 : Les infiltrations d'air entre les Locaux Techniques et l'extérieur ont été estimées à 47 [m³/h]. Écrire le bilan thermique de la zone Locaux Techniques afin de déterminer l'expression littérale de sa température notée θ_{LT} . Faire l'application numérique.

Question 18 : On envisage de désolidariser complètement la zone des Locaux Techniques des autres zones. Dans ce cas le coefficient H_{p5} est égal à 4,46 [W/K]. Déterminer les déperditions par les parois de l'ensemble du bâtiment dans ce cas de figure et dans le cas où la zone reste accolée.

Question 19 : Quelle est la quantité d'énergie économisée pour une journée à la température de -6 [°C] en considérant un chauffage continu à 19 [°C]?

Question 20 : À partir des résultats précédents, conclure sur l'influence des locaux techniques accolés.

ÉTUDE 3 : Influence de l'intermittence de chauffage

L'objectif de cette partie est d'évaluer la puissance de chauffage et les économies réalisables, liées à un fonctionnement intermittent du chauffage en fonction de l'occupation du bâtiment.

Hypothèses :

- Le régime est transitoire
- L'étude sera faite sur une journée de 24h en supposant la température extérieure constante et égale à -6 [°C]

Données

- $T_{int} = 19$ [°C] de 8h à 20h et $T_{int} = 15$ [°C] de 20h à 8h le matin.
- On note :
 - H_T le coefficient de déperditions totales du bâtiment en [W/K],
 - MC la capacité calorifique globale équivalente en [J/K]
 - P la puissance de chauffage en [W]
 - $\theta_i(t)$ la température intérieure à l'instant t
 - θ_e la température extérieure
 - θ_o la température intérieure atteinte en régime permanent établi
- Valeurs numériques : $H_T = 528$ [W/K] , $MC = 21\,500$ [kJ/K]

Travail demandé

Question 21 : Supposons le régime permanent établi à une température $\theta_o = 15$ [°C] durant la nuit. Établir l'expression de la température intérieure du bâtiment en fonction du temps lors de la montée en température.

Question 22 : Identifier la constante de temps du phénomène et calculer sa valeur numérique. Que caractérise-t-elle ?

Déterminer - la limite de $\theta_i(t)$ pour $t \rightarrow \infty$

- la dérivée de $\theta_i(t)$ à l'instant $t = 0$ avec $\theta_o = \theta_e$

En déduire l'influence théorique des termes H_T et MC .

Question 23 : Afin de retrouver une température intérieure égale à 19 [°C] à 8h le matin, expliquer pourquoi il est nécessaire d'augmenter la puissance de chauffage quelques heures plus tôt.

À partir de la relation établie question 21, déterminer la puissance de chauffage nécessaire notée P_{max} pour que la température intérieure passe de $\theta_o = 15$ [°C] à $\theta_1 = 19$ [°C] entre 6h et 8h du matin.

Question 24 : Comparer cette puissance avec celle nécessaire, notée P_o , pour maintenir une température de 19 [°C] la journée au sein du bâtiment, et en déduire le coefficient de surpuissance $C_s = P_{max}/P_o$.

Question 25 : Le coefficient C_s a été fixé à $1,3$. Déterminer l'heure à laquelle il faut programmer P_{max} afin d'avoir une température de 19 [°C] à 8h le matin.

Question 26 : Calculer l'énergie consommée sur une journée dans le cas d'un chauffage continu à 19 [°C]. Comparer le résultat avec celui d'un chauffage intermittent en considérant une valeur de $C_s = 1,3$.

Question 27 : Conclure sur l'intérêt de l'intermittence de chauffage et commenter les résultats obtenus en indiquant les limites de la méthode de calcul proposée.

PARTIE 3 – Étude de sols

(6 points)

Avertissement

Les différentes questions peuvent être traitées de manière indépendante. Toute donnée numérique non fournie est laissée à l'appréciation des candidats. Les candidats se reporteront lorsque nécessaire aux annexes sols. Les documents supports utilisés par les candidats seront joints aux copies.

Généralités

L'objectif de cette partie est d'étudier le sol et les appuis du centre de tri des déchets.

Étude géotechnique du site

La carte géologique du site fournit les premiers éléments d'appréciation de l'environnement géotechnique du site d'aménagement. Les différents sondages réalisés mettent en évidence un sol essentiellement constitué de sables limoneux et/ou argileux et de marnes.

Question 28 : À quelle famille de roches appartiennent les marnes ? Quels sont leurs constituants principaux ? Quelle différence faites-vous entre calcaires et marnes ?

Question 29 : Les caractéristiques du sol correspondant aux sondages concernant le bâtiment de tri des déchets sont données dans le tableau n°1. En fonction de ces informations, quel est le classement du sol selon le guide GTR correspondant au sondage P104 à 1m ?

Nature et caractéristiques des matériaux

Le bâtiment sera établi sur une plateforme en déblai. La hauteur de déblai sera prise égale à 2m. L'assise porteuse est constituée de sables de faciès Sf et Sa.

Question 30 : Expliquer en quoi la nature des sols de l'assise peut influencer sur le comportement du matériau. Quelles sont les précautions à prendre vis à vis de l'instabilité des parois de la fouille ?

On considère le sol d'assise comme un massif homogène, semi-infini. Il est caractérisé par son poids volumique γ et ses caractéristiques de cisaillement à long terme c' et ϕ' .

Question 31 : En vous référant au sondage SP204, donner la valeur des contraintes verticales et horizontales à la profondeur $z=3m$. On supposera le coefficient des terres au repos $K_0=0,5$. Les poids volumiques γ des sables sont de $19,5 \text{ kN/m}^3$ pour le sable limoneux brun et de $18,6 \text{ kN/m}^3$ pour le sable très fin beige clair. Quel usage peut-on faire de ces valeurs ?

Un échantillon de matériau a été prélevé à la profondeur de 4,5m. Le poids spécifique des grains est égal à $26,5 \text{ kN/m}^3$. On mesure son poids volumique sec $\gamma_d=16,8 \text{ kN/m}^3$. Son poids volumique total $\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$.

Question 32 : Déterminer l'indice de vides, le degré de saturation et la teneur en eau de cet échantillon. Quel peut être l'intérêt de connaître ces valeurs ?

Parmi les sondages réalisés, un forage avec essai pressiométrique (SP204) a été réalisé pour effectuer la reconnaissance en profondeur. Les résultats du forage sont donnés en annexe. L'essai réalisé à 23m est détaillé tableau n°2. P désigne la pression lue au manomètre du pressiomètre, supposé à 1m au-dessus du terrain naturel (TN). ΔV_{30} et ΔV_{60} sont les volumes injectés respectivement à 30s et à 60s à chaque palier. La courbe d'étalonnage de la sonde est donnée tableau n°3. On considère un volume initial de la sonde $V_s = 530 \text{ cm}^3$.

Question 33 : Décrire le principe de l'essai pressiométrique. On fera un schéma explicatif clair.

Question 34 : Faire le dépouillement de l'essai donné et en déduire les caractéristiques pressiométriques du sol.