

SESSION 2016

**CAPET
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
Option : ARCHITECTURE ET CONSTRUCTION
Option : ÉNERGIE
Option : INFORMATION ET NUMÉRIQUE
Option : INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

ANALYSE D'UN SYSTÈME PLURITECHNIQUE

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

Ce sujet comporte 3 parties :

- présentation et travail demandé pages 2 à 20 ;
- documents annexes pages 21 à 25 ;
- documents réponses pages 26 à 29.

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Le candidat doit répondre aux différentes questions du sujet sur les documents réponses quand cela est demandé, et sur feuilles de copie quand cela n'est pas précisé.

Il lui est rappelé qu'il doit utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Il sera tenu compte de la présentation de la copie, de la qualité de la rédaction (orthographe et syntaxe), en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul.

Si le sujet (les questions ou les annexes) conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il est demandé au candidat de la (ou les) mentionner explicitement sur la copie.

« L'OBSERVATOIRE » : LA MAISON ACTIVE NATURELLEMENT

I. MISE EN SITUATION

1. Contexte général

Depuis le protocole de Kyoto en 1997, la France, avec d'autres pays, s'est engagée à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment à l'horizon 2050. Le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire est le premier consommateur d'énergie en France, avec environ 46 % de la consommation énergétique annuelle (70,4 millions de tonnes équivalent pétrole), loin devant les transports et l'industrie. Ce secteur contribue pour près du quart des rejets de CO₂ dans l'hexagone. Dans ce cadre, en 2010, la région Alsace a lancé un projet de construction de bâtiments performants en énergie. « L'Observatoire » est une maison prototype, actuellement ouverte au public, servant de démonstrateur.

2. L'Observatoire

Le chantier d'un bâtiment conçu comme une maison individuelle a démarré en 2010 à Oberschaeffolsheim (commune proche de Strasbourg à 160 m d'altitude). Cette maison appelée l'Observatoire a été inaugurée en juin 2012 (voir le document annexe A0). D'une superficie de 223 m² ce bâtiment a été réalisé en respectant des critères de construction de Haute Qualité Environnementale (HQE).

L'objectif principal de la construction a été de créer un bâtiment à énergie positive en utilisant divers matériaux et modes de construction de manière à constituer une vitrine en matière d'efficacité énergétique destinée aux particuliers et aux professionnels. Les intervenants sur le chantier ont été prioritairement des entreprises locales.



Figure 1 : l'Observatoire

3. Principes de construction

Les caractéristiques principales de la construction de l'Observatoire sont les suivantes :

- présence d'équipements de production d'énergie afin de passer en « énergie positive » ;
- aménagement intérieur de la maison conçu pour une famille de 4 personnes et respectueux de l'environnement et du bien-être ;
- diversité des solutions techniques choisies au niveau de la structure, de l'isolation et de l'étanchéité en vue d'atteindre un haut niveau de performance énergétique ;
- maison entièrement domotisée et instrumentée.

4. Description des solutions techniques

Structure et matériaux :

- intervention d'industriels locaux ;
- mixité des matériaux utilisés (bois, béton, brique, terre) ;
- au rez-de-chaussée, maçonnerie en briques en terre cuite bénéficiant de Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires et d'une durée de vie de 100 ans ;
- à l'étage, ossature bois de provenance locale ;
- présence d'un mur en terre (provenant du jardin) dans la pièce principale à l'étage.

Isolation :

- différents types d'isolation rapportée et répartie utilisant des matériaux respectueux de l'environnement (ouate de cellulose sans sel de Bore, polystyrène, laine minérale) ;
- triple vitrage en bois ;
- utilisation de matériaux isolants ayant de bonnes capacités de déphasage thermique.

Équipements énergétiques :

- pompe à chaleur géothermique pour assurer le chauffage de la maison et la production d'eau chaude sanitaire ponctuellement ;
- planchers chauffants, convecteurs ;
- ventilation mécanique contrôlée en flux et en qualité de l'air ;
- luminaires LED et basse consommation ;
- 2 panneaux solaires thermiques pour les besoins en eau chaude sanitaire ;
- 56 panneaux photovoltaïques pour assurer la production d'énergie électrique permettant de produire $41 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ (kilo watt heure par mètre carré par an).

Étanchéité :

- toiture équipée d'un système d'étanchéité intégrant des panneaux photovoltaïques sur plots ;
- façade végétalisée ;
- bardage en bois.

Équipements intérieurs :

- tableaux de bord énergétiques pour visualiser les différentes consommations d'énergie ;
- systèmes de gestion automatique de l'éclairage et du chauffage.

Décoration :

- boiseries extérieures, revêtements extérieurs et intérieurs peints uniquement avec des produits en phase aqueuse à faible teneur en COV (Composés Organiques Volatiles).

5. Problématique générale du sujet

Dans un premier temps, le sujet vise à mettre en évidence la relation entre le respect de l'environnement et la construction d'une habitation, puis à étudier différentes solutions techniques choisies lors de la construction de l'Observatoire comme par exemple l'isolation, la pompe à chaleur géothermique, le système de production d'énergie électrique et la poutre utilisée pour la ventilation à l'étage. L'objectif est à chaque fois de justifier la pertinence environnementale et technique de ces choix.

II. CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES ET HABITAT

Objectif : *mettre en évidence le lien entre la construction d'une maison individuelle et les exigences réglementaires en matière de respect de l'environnement.*

1. Enjeux globaux

Question 1

Expliquer pourquoi il est nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre de manière générale. Préciser le lien entre l'habitat individuel et cette problématique. Au sein d'une habitation, préciser les différents gestes qui peuvent permettre à chacun de contribuer à un meilleur respect de l'environnement. On limitera la réponse à une dizaine de lignes maximum.

2. Cas particulier de l'Observatoire

Question 2

À partir des solutions techniques choisies pour l'Observatoire, expliquer en quoi ce projet s'inscrit dans une démarche de conception faisant appel à des critères de Haute Qualité Environnementale (HQE).

Parmi les solutions techniques utilisées, préciser celles qui ont contribué à la réduction du coût carbone lors de la construction du bâtiment.

Le document réponse DR1 indique les exigences énergétiques de la réglementation thermique RT 2012 et de divers labels environnementaux (BBC-Effinergie, Minergie et Passivhaus). Les données relatives aux consommations de l'Observatoire se trouvent également sur ce document.

Le BEPAS (Bilan Énergétique Passif) indique les différents postes de consommation de l'Observatoire sans tenir compte de la production d'énergie des panneaux photovoltaïques. Le BEPOS (Bilan Énergétique Positif) indique les différents postes de consommation de l'Observatoire en tenant compte de la production d'énergie des panneaux photovoltaïques.

Question 3

En se plaçant dans le cadre du BEPAS de l'Observatoire, conclure sur le respect de la réglementation thermique RT 2012 et des différents labels environnementaux.

Question 4

En se plaçant dans le cadre du BEPOS de l'Observatoire, indiquer sur le document réponse DR1, la production électrique en $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. Expliquer pourquoi la maison possède un bilan d'énergie primaire positif sachant que la consommation en énergie primaire ne compte pas l'électroménager. Donner la valeur de l'excédent énergétique en $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. Donner la consommation globale (électroménager inclus) de l'Observatoire en $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. Écrire le résultat dans la dernière colonne du document réponse DR1.

III. ÉTUDE DE L'ISOLATION DE L'OBSERVATOIRE

Objectif : étudier les performances thermiques et hygrothermiques des parois à ossature bois et le risque de condensation.

L'isolation des murs et toitures de l'Observatoire a été réalisée en utilisant différentes combinaisons de matériaux. La diffusion de vapeur d'eau dans les parois peut entraîner un phénomène de condensation. À la surface des parois, la condensation peut entraîner une détérioration des revêtements (cloquage des peintures...). À l'intérieur des parois, elle peut engendrer une dégradation des matériaux.

Pour examiner les risques de condensation, une étude thermique et hygrothermique va être menée sur une des parois de l'Observatoire.

À l'étage, les murs ont été réalisés avec une ossature bois. La figure 2 décrit la composition de la paroi ainsi que les caractéristiques des matériaux utilisés pour assurer l'isolation.

Composants	Épaisseur (m)	Résistance thermique R_{th} ($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$)	Résistance au passage de la vapeur d'eau R_{vap} ($m^2 \cdot s \cdot Pa \cdot \mu g^{-1}$)
Ambiance interne		0,13	
Plaque de plâtre BA13	0,013	0,04	0,48
Lame d'air > 1,3 cm	0,015	0,17	0,08
Panneau de bois OSB (Oriented Strand Board)	0,012	0,09	13,71
Ouate de cellulose	0,14	3,5	0,74
Panneau de bois OSB (Oriented Strand Board)	0,01	0,08	6,21
Polystyrène	0,16	4,32	5,05
Enduit extérieur	0,015	0,01	0,55
Ambiance externe		0,13	

Figure 2 : composition de la paroi

On se place dans les conditions décrites sur la figure 3.

Température ($^\circ C$)	Taux d'humidité relative HR
Intérieure $19^\circ C$	Intérieure 60 %
Extérieure $-5^\circ C$	Extérieure 90 %

Figure 3 : caractéristiques des deux côtés de la paroi

Le taux d'humidité relative HR représente la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.

1. Étude thermique

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est à l'origine d'une diffusion de chaleur couplée à une diffusion de vapeur.

La loi de Fourier décrit la proportionnalité entre le flux d'énergie thermique échangé noté ϕ_i et la variation de température ΔT à travers une paroi. En régime stationnaire cette relation fait intervenir la résistance thermique R_{th} de la paroi telle que :

$$\phi_t = -\frac{\Delta T}{R_{th}}$$

avec ϕ_t en $W \cdot m^{-2}$, ΔT en $^{\circ}C$ et R_{th} en $m^2 \cdot ^{\circ}C \cdot W^{-1}$.

Dans cette relation ΔT est positif. Le signe «-» indique l'abaissement de la température à travers la paroi.

Question 5

La figure 2 indique la résistance thermique de chaque matériau composant la paroi. Calculer le flux d'énergie thermique échangé à travers toute la paroi.

Question 6

En déduire les valeurs des températures aux différentes interfaces. Écrire les résultats dans la colonne «Température interface» sur le document réponse DR2.

2. Étude hygrothermique

La pression de vapeur saturante correspond à la pression de l'air quand le taux d'humidité relative HR est de 100 %. Sa valeur dépend de la température selon la relation suivante : $P_s = \exp\left(25,5058 - \frac{5204,9}{T + 273}\right)$. Lorsque $HR < 100\%$, on parle de pression partielle P_v . Sa valeur est liée à celle de la pression de vapeur saturante selon la relation suivante : $P_v = HR \times P_s$.

Question 7

Calculer les valeurs des pressions de vapeur saturante à chaque interface. Écrire les résultats dans la colonne «Pression de vapeur saturante» sur le document réponse DR2.

Question 8

Calculer la valeur de la pression partielle à l'intérieur P_{vint} et à l'extérieur P_{vext} . Écrire les résultats dans la dernière colonne «Pression partielle» sur le document réponse DR2.

La loi de Fick décrit la proportionnalité entre la quantité d'eau g traversant une paroi et la variation de pression partielle ΔP . En régime stationnaire cette relation fait intervenir la résistance au passage de la vapeur R_{vap} de la paroi telle que :

$$g = -\frac{\Delta P}{R_{vap}}$$

avec g en $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, ΔP en Pa et R_{vap} en $m^2 \cdot s \cdot Pa \cdot \mu g^{-1}$.

Dans cette relation ΔP est positif. Le signe «-» indiquant l'abaissement de la pression à travers la paroi.

Question 9

La figure 2 indique la résistance au passage de la vapeur d'eau de chaque matériau composant la paroi. Calculer la quantité de vapeur d'eau notée g diffusée à travers toute la paroi.

Question 10

Calculer les pressions partielles aux interfaces et écrire les résultats dans la colonne «Pression partielle» sur le document réponse DR2.

Le risque de condensation existe si la pression partielle dépasse la pression de vapeur saturante.

Question 11

Conclure sur le risque de condensation dans la paroi.

IV. ÉTUDE DE L'INSTALLATION DE GÉOTHERMIE

Objectif : valider la pertinence écologique du choix de la solution de chauffage.

1. Description de l'installation

Les besoins en chauffage de l'Observatoire sont assurés par une installation géothermique. Ponctuellement, la pompe à chaleur sert à l'alimentation en eau chaude sanitaire en complément de deux panneaux solaires thermiques situés sur la toiture.

Les besoins énergétiques de l'Observatoire sont les suivants :

- puissance moyenne de 2,2 kW sur un an pour le chauffage ;
- puissance moyenne de 0,35 kW sur un an pour l'eau chaude sanitaire.

La pompe à chaleur (PAC) est installée dans un local technique situé au rez-de-jardin.

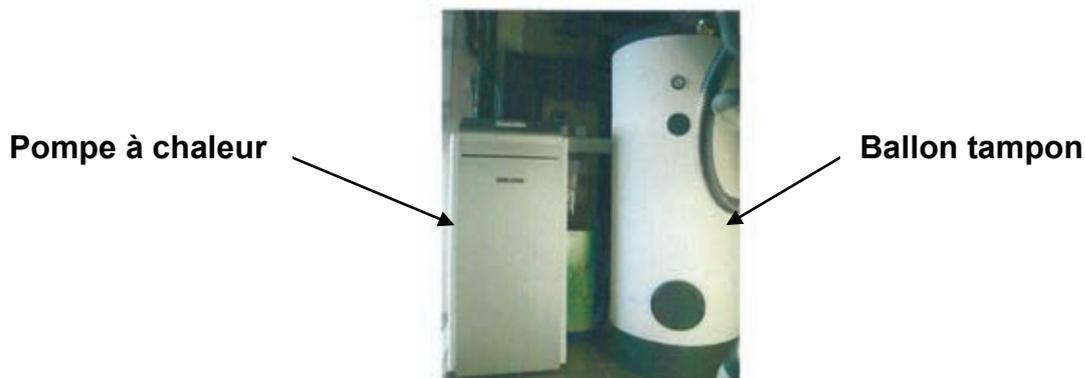


Figure 4 : local technique de l'Observatoire

Le système géothermique représenté sur les figures 4, 5 et 6 est composé des éléments cités ci-dessous :

- sondes verticales enterrées à 30 m de profondeur (sondes hélicoïdales) ;
- pompe à chaleur faible chaleur (eau glycolée/eau) ;
- ballon tampon ;
- réseau de chauffage basse température (ventilo-convecteurs et planchers chauffants) ;
- armoire de régulation.

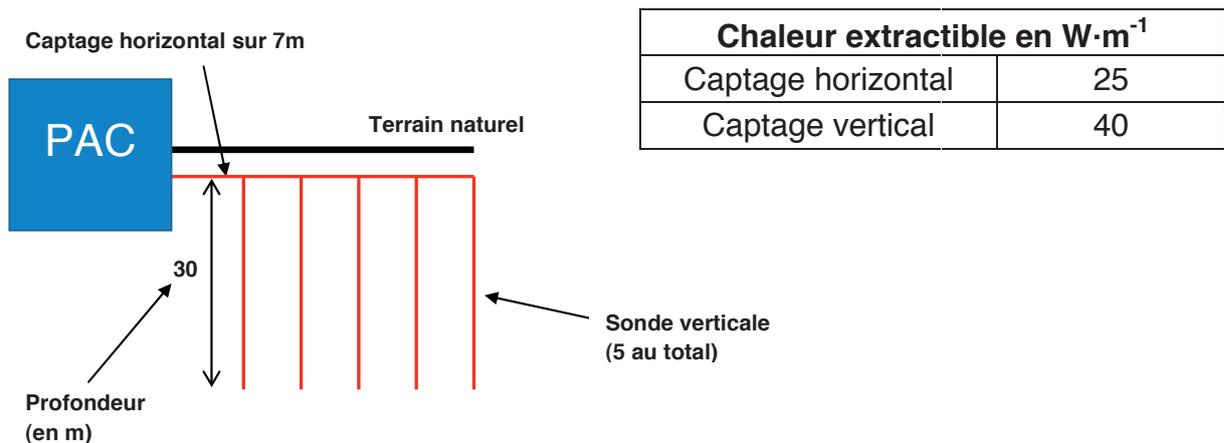


Figure 5 : installation des sondes verticales dans le sous-sol de l'Observatoire



Figure 6 : plancher chauffant de l'Observatoire

Les caractéristiques de la pompe à chaleur fournies par le constructeur sont données sur la figure 7.

Fournisseur	Stiebel Eltron
Type	WPF 7 cool
Puissance thermique maximale	7,7 kW
Puissance frigorifique maximale	6,02 kW
Coefficient de performance (COP)	4,38
Prix de la PAC	8000 €
Fluide frigorigène	R-410a

Figure 7 : caractéristiques de la pompe à chaleur

2. Prélèvement de la chaleur dans le sous-sol

Question 12

Calculer la quantité de chaleur Q_{extraite} extraite du sous-sol de l'Observatoire par les sondes. Conclure sur la pertinence de l'installation par rapport à la puissance thermique de la pompe à chaleur.

3. Étude des performances de la pompe à chaleur

Une pompe à chaleur permet de transférer de la chaleur d'une source à basse température (source froide) vers une source à température plus élevée (source chaude). Un schéma de principe est donné sur la figure 8.

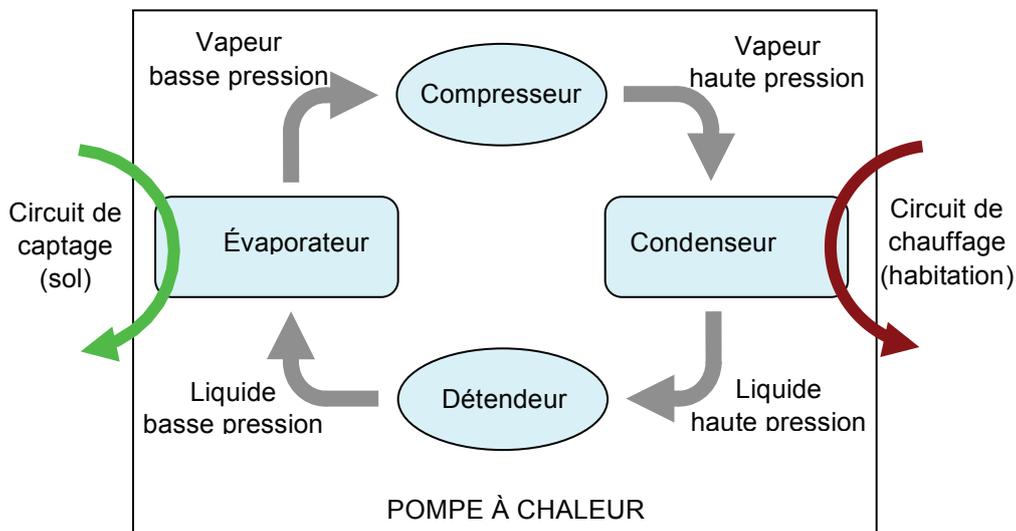


Figure 8 : schéma de principe de la pompe à chaleur

La pompe à chaleur utilise un fluide frigorigène qui change de phase à des basses températures. Ce fluide, au départ à basse pression, récupère les calories de la source froide en s'évaporant, puis est comprimé. Une fois à haute pression, il transfère de la chaleur à la source chaude (l'eau circulant dans les planchers chauffants). Le fluide frigorigène est ensuite détendu afin de revenir à son état initial.

La figure 9 illustre le transfert de chaleur de la source froide vers la source chaude sur un cycle. On note T_f la température de la source froide et T_c la température de la source chaude. Sur un cycle, le fluide frigorigène reçoit le travail W du compresseur et échange les chaleurs Q_1 et Q_2 respectivement avec les sources chaude et froides. Par convention, ces grandeurs sont comptées positivement si elles sont reçues par le fluide.

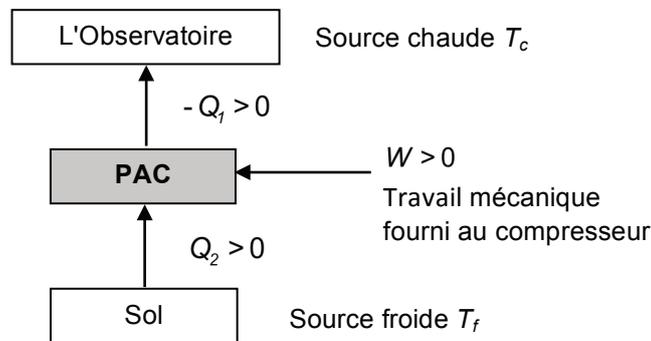


Figure 9 : transfert de chaleur sur un cycle

Question 13

Écrire la relation entre W , Q_1 et Q_2 traduisant la conservation de l'énergie sur un cycle.

Le bilan entropique sur un cycle parcouru de manière réversible permet d'obtenir l'équation suivante : $\frac{Q_1}{T_c} + \frac{Q_2}{T_f} = 0$.

La performance d'une pompe à chaleur se mesure par le coefficient de performance (COP) :
$$\text{COP} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie consommée (facturée)}}$$
.

Question 14

Donner l'expression du coefficient de performance théorique maximal de la pompe à chaleur en fonction des températures T_f et T_c .

Question 15

Justifier le choix d'installer dans l'Observatoire un chauffage dit « basse température » (l'eau circulant dans le circuit de chauffage ne dépassant pas 35°C).

Question 16

Afin de fournir à l'habitation le flux d'énergie thermique ϕ nécessaire au chauffage, n cycles par seconde sont effectués. Donner l'expression de ϕ en fonction de n et de Q_1 puis en déduire son expression en fonction de n , W et COP.

Le compresseur fournissant le travail W au fluide a un rendement global noté r_g égal à 0,9.

Question 17

Donner l'expression de la puissance électrique notée P_e à fournir au moteur entraînant le compresseur en fonction de n , W et r_g . En déduire son expression en fonction de ϕ , COP et r_g .

Question 18

En utilisant la valeur du coefficient de performance réel fournie par le constructeur, calculer la puissance P_e nécessaire pour assurer les besoins en chauffage. Comparer avec une solution utilisant uniquement des radiateurs électriques dont le rendement avoisine les 100 %.

4. Aspects économiques et environnementaux

La figure 10 présente des éléments de comparaison entre les coûts moyens d'exploitation des différentes sources d'énergie.

	Coût d'exploitation par an en euros
Électrique	2 000
Granulés bois	1 200
Gaz naturel	1 250
Fioul	2 200

Figure 10 : coût de différentes sources d'énergie

Question 19

En utilisant le résultat trouvé à la question 18 calculer une estimation du coût d'utilisation sur un an de l'installation. Le prix d'un kWh est de 0,13 €. Conclure sur l'intérêt économique d'une installation de géothermie par rapport aux autres sources d'énergie possibles.

La figure 11 présente les taux d'émissions de CO_2 de différentes sources d'énergie. La figure 12 indique les caractéristiques de différents fluides frigorigènes.

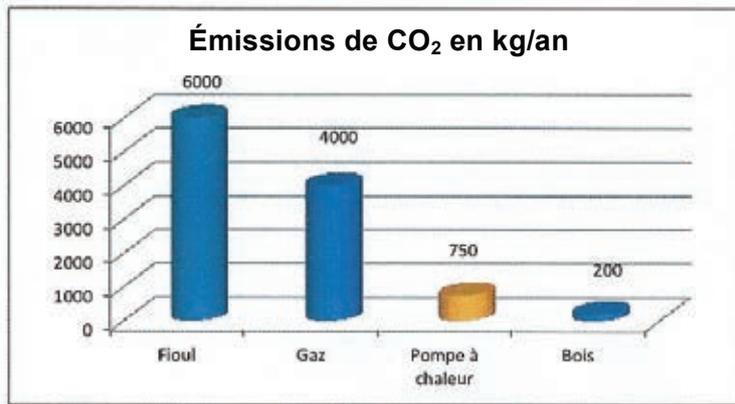


Figure 11 : taux d'émission de CO₂ de différentes sources d'énergie

Nature du fluide frigorigène	Pouvoir de réchauffement global (kg CO ₂)	Particularités
Fort impact sur l'effet de serre :		
R-22 (HCFC)	1700	Destructeur couche d'ozone interdit
R-134a (HFC)	1300	Jusqu'à 65°C
R-407c (HFC)	1600	Jusqu'à 55°C
R-404a (HFC)	3800	
R-410a (HFC)	1900	Jusqu'à 45°C
Faible impact sur l'effet de serre :		
R-290 (propane)	3	Inflammabilité
CO ₂	1	En expérimentation
NH ₃	0,1	Emanations toxiques

Figure 12 : caractéristiques de fluides frigorigènes

Question 20

Dans le cadre du respect de l'environnement, conclure sur les avantages et inconvénients d'une installation de géothermie.

V. ÉTUDE DU SYSTÈME DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE

Objectif : valider les performances de la solution photovoltaïque.

La toiture de l'Observatoire est équipée de 56 panneaux photovoltaïques. Les figures 13 et 14 et le document annexe A1 donnent les caractéristiques du dispositif.



Figure 13 : panneaux photovoltaïques



Figure 14 : plots de fixation

Question 21

Calculer la production annuelle d'énergie électrique en kWh produite par l'installation complète.

Question 22

Sachant que la superficie de l'Observatoire est de 223 m² relier la valeur calculée à la question précédente à celle annoncée dans les performances globales en début de sujet.

Question 23

L'inclinaison des panneaux est très faible. Ce choix a été fait pour des raisons esthétiques. Expliquer la conséquence sur la production d'énergie électrique.

L'installation est constituée de 56 modules Premium L Poly 245 Wc dont les caractéristiques sont données sur le document annexe A2.

Question 24

Donner la signification des grandeurs caractéristiques notées U_{MPP} , U_{OC} , I_{MPP} et I_{SC} indiquées sur le document annexe A2.

Question 25

La caractéristique du courant débité i en fonction de la tension v aux bornes d'un panneau, est fournie sur le document réponse DR3. Compléter cette caractéristique en y plaçant les grandeurs citées à la question précédente.

Question 26

Sur le document réponse DR3, tracer l'allure de la caractéristique de puissance p délivrée par un panneau en fonction de la tension à ses bornes v . Compléter cette caractéristique en y plaçant les valeurs numériques de U_{MPP} et P_{MAX} .

Question 27

Sur le document réponse DR3, représenter l'allure de la caractéristique $i(v)$ si les conditions d'éclairement sont réduites de moitié sous 25°C et avec un indice de masse d'air $AM = 1,5$ (voir le document annexe A2).

Question 28

Sur le document réponse DR3, représenter l'allure de la caractéristique $p(v)$ si les conditions d'éclairement sont réduites de moitié, sous 25°C et avec un indice de masse d'air $AM = 1,5$.

Comme dans toute installation photovoltaïque en site isolé, le circuit de production d'énergie électrique de l'Observatoire nécessite des onduleurs, des batteries et un régulateur en plus des panneaux photovoltaïques.

La documentation technique des onduleurs préconisés est présentée sur le document annexe A3. Leur référence est Sunny Boy 3800.

Question 29

Déterminer le nombre d'onduleurs nécessaires au bon fonctionnement de l'installation électrique photovoltaïque.

Question 30

Proposer un synoptique montrant les connexions entre les panneaux, les onduleurs, les récepteurs passifs, les régulateurs et les batteries. Préciser également le sens des transferts d'énergie possible entre ces éléments.

VI. DIMENSIONNEMENT DE LA POUTRE UTILISÉE POUR LA VENTILATION ET LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Objectif : valider le dimensionnement d'une poutre de grande portée utilisée pour la ventilation et le contrôle de la qualité de l'air

La pièce de vie située à l'étage est un espace ouvert car le nombre de cloisons est volontairement limité. Une poutre de grande portée (de la longueur de la pièce) a été installée pour permettre le passage d'une gaine utilisée pour la ventilation intérieure et de câbles. Cette poutre est donc creuse et prend appui en ses deux extrémités sur les murs porteurs et sur un poteau de soutien visible sur la figure 15.

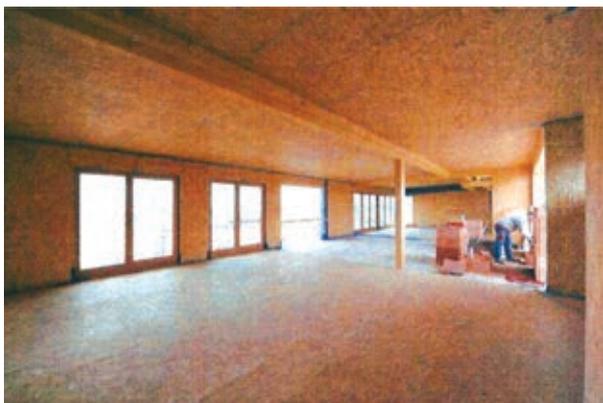


Figure 15 : poutre dans la pièce de vie

1. Première modélisation

L'objectif de cette partie est de justifier l'emploi du poteau de soutien par un critère de résistance puis de valider le dimensionnement de la poutre en contraintes et en déformations.

Compte tenu de l'implantation de la poutre et du chargement qui lui est appliqué, un premier modèle de sollicitation en flexion simple, ne tenant pas compte du poteau de soutien, est retenu (voir figure 16).

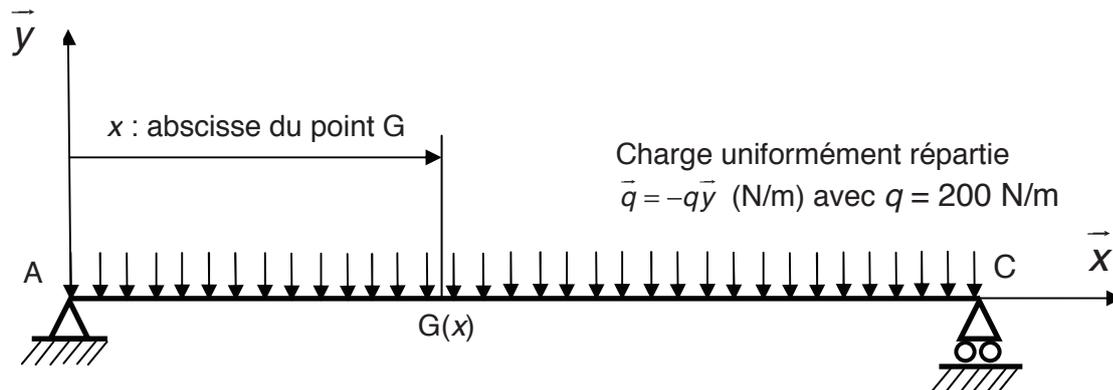


Figure 16 : premier modèle de la poutre de longueur L

On notera :

- $AC = L$ (en m) avec $L = 12$ m ;
- G le point courant de la ligne moyenne d'abscisse x ($\overline{AG} = x\vec{x}$).
- les réactions aux appuis sur la poutre (AC) en A et C, $\vec{R}_A = X_A\vec{x} + Y_A\vec{y}$ et $\vec{R}_C = Y_C\vec{y}$.

Question 31

Donner l'expression des réactions aux appuis en A et C notées Y_A et Y_C en fonction de q et L . Faire l'application numérique.

Question 32

Donner l'expression du moment fléchissant $M_{fz}(x)$ et tracer l'allure de son diagramme le long de la poutre (AC). Préciser la section la plus sollicitée et le moment fléchissant maximal correspondant M_{fzmaxi} en fonction de q et L .

Le profil de la section droite est défini sur la figure 17.

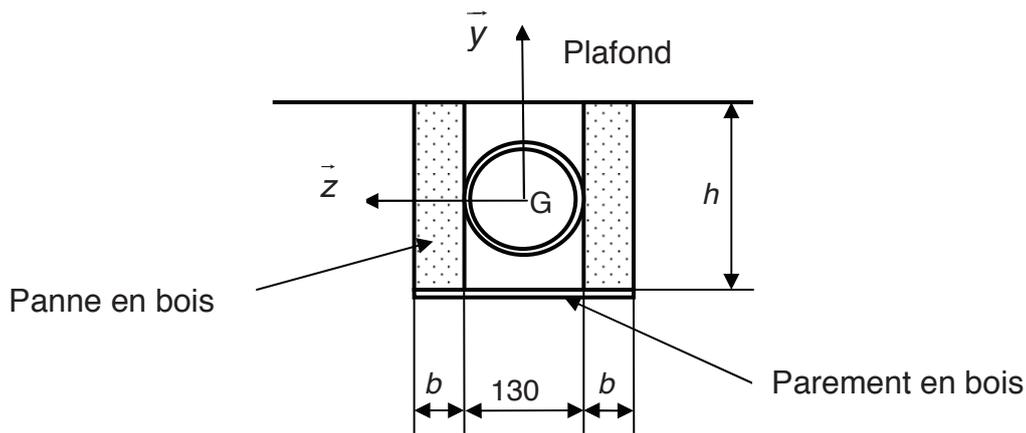


Figure 17 : section droite de la poutre

La poutre est en fait constituée de deux pannes en bois lamellé-collé, identiques de section $b \cdot h$, montées en parallèle. La distance entre les deux pannes ne peut être inférieure à 130 mm car la gaine de ventilation et les câbles sont installés entre ces deux éléments. Un parement en bois est plaqué sur la partie inférieure des deux pannes afin d'obturer le passage de la gaine.

Pour les calculs de dimensionnement, le modèle de structure associé à la poutre négligera l'influence du parement inférieur en bois et sera limité aux deux pannes.

Question 33

Donner l'expression de la contrainte normale maximale en traction σ_{max} en fonction de q , L , b et h . Représenter à l'aide d'un schéma simple et précis la répartition des contraintes normales dans la section droite. On donne le moment quadratique de la section droite de la poutre : $I_{Gz} = \frac{2bh^3}{12}$.

$$I_{Gz} = \frac{2bh^3}{12}$$

Pour une raison esthétique, l'architecte souhaite limiter les dimensions de la section de la poutre à une hauteur $h = 150$ mm maxi et à une épaisseur $b = 30$ mm.

La contrainte élastique limite admissible en traction pour le bois lamellé-collé utilisé pour les pannes est $\sigma_{pe} = 10$ MPa.

Question 34

Les dimensions retenues pour les deux pannes permettent-elles de satisfaire la condition de résistance mécanique (justifier numériquement la réponse) ?

La solution retenue par l'architecte consiste à placer un poteau de soutien de la poutre au milieu de celle-ci.

La poutre est alors constituée de deux poutres (AB) et (BC) mesurant chacune 6 m de longueur.

Chaque poutre de 6 m prend appui à une extrémité sur le mur et à l'autre extrémité sur le poteau.

Question 35

Cette solution permet-elle de satisfaire à la condition de résistance mécanique ?

Une poutre en bois se calcule en contraintes mais également en déformations.

Le module d'élasticité longitudinal du bois lamellé-collé est $E = 12$ GPa.

La modélisation de flexion simple proposée précédemment reste valable pour l'étude en déformation de chacune des deux poutres utilisées dans la solution alternative et est définie sur la figure 18 :

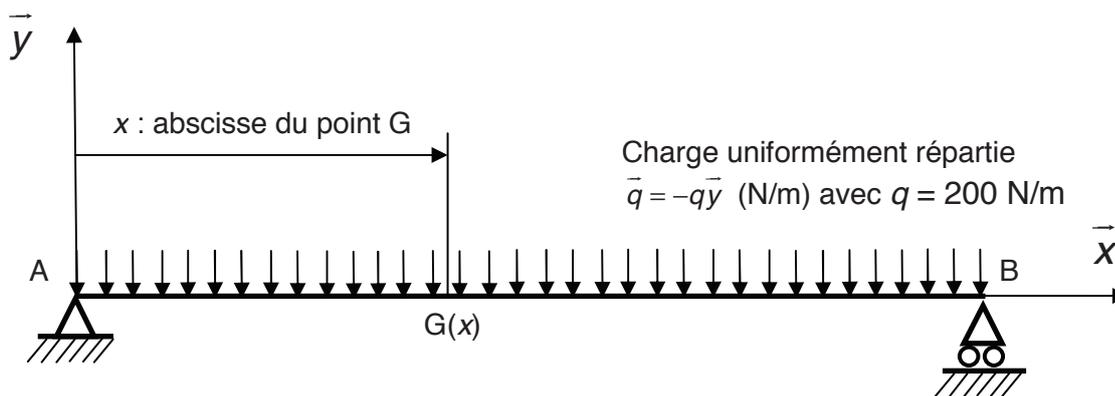


Figure 18 : modèle de la poutre de longueur $\frac{L}{2}$

On notera : $AB = \frac{L}{2}$ (en m) avec $L = 12$ m.

Question 36

À partir du moment fléchissant $M_{Iz}(x)$, en déduire la valeur de la flèche maximale notée y_{maxi} en fonction de q , L , E et du moment quadratique I_{Gz} .

Question 37

Faire l'application numérique et conclure sur la pertinence de la solution alternative introduisant un poteau de soutien.

2. Deuxième modélisation

Dans cette deuxième étude, le chargement de la poutre est similaire mais on considère la poutre sur trois appuis comme indiqué sur la figure 19 :

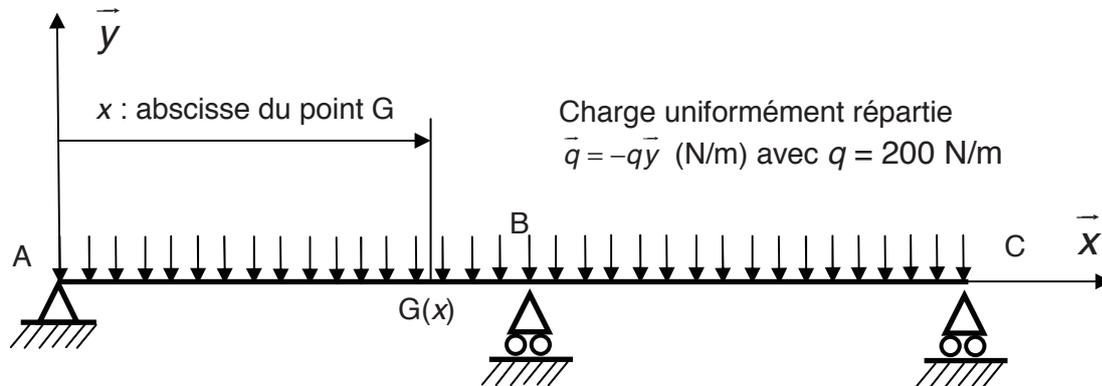


Figure 19 : deuxième modèle de la poutre

On notera :

- $AC = L$ (en m), $AB = \frac{L}{2}$ (en m) ;
- G le point courant de la ligne moyenne d'abscisse x ($\overline{AG} = x\overline{x}$) ;
- $\vec{R}_A = X_A\vec{x} + Y_A\vec{y}$, $\vec{R}_B = Y_B\vec{y}$ et $\vec{R}_C = Y_C\vec{y}$ les réactions aux appuis sur la poutre (AC) en A, B et C

La section de la poutre ainsi que les propriétés du matériau sont similaires à celles du premier modèle.

Question 38

Écrire les deux équations reliant Y_A , Y_B , Y_C , q et L .

Question 39

Pour $x \in \left[0, \frac{L}{2}\right]$ donner l'expression de la flèche notée $y_1(x)$ en fonction de Y_A , q , E , du moment quadratique I_{GZ} et des constantes d'intégration notées C_1 et C_2 .

Question 40

Justifier la condition limite $y_1'\left(\frac{L}{2}\right) = 0$.

En utilisant cette condition limite, et celles en A et B caractérisant la flèche de la poutre, déterminer l'expression de Y_A , Y_B et Y_C en fonction de q et L . Calculer les valeurs de Y_A , Y_B et Y_C . Comparer avec les valeurs trouvées à la question 31.

L'architecte a fait le choix de mettre un poteau au milieu de la poutre. Mais pour éviter d'avoir un poteau qui repose au sol, une autre solution aurait pu être envisagée. Par exemple, des câbles en acier auraient pu être mis en place pour soutenir un poteau en bois situé au milieu de la poutre comme décrit sur la figure 20.

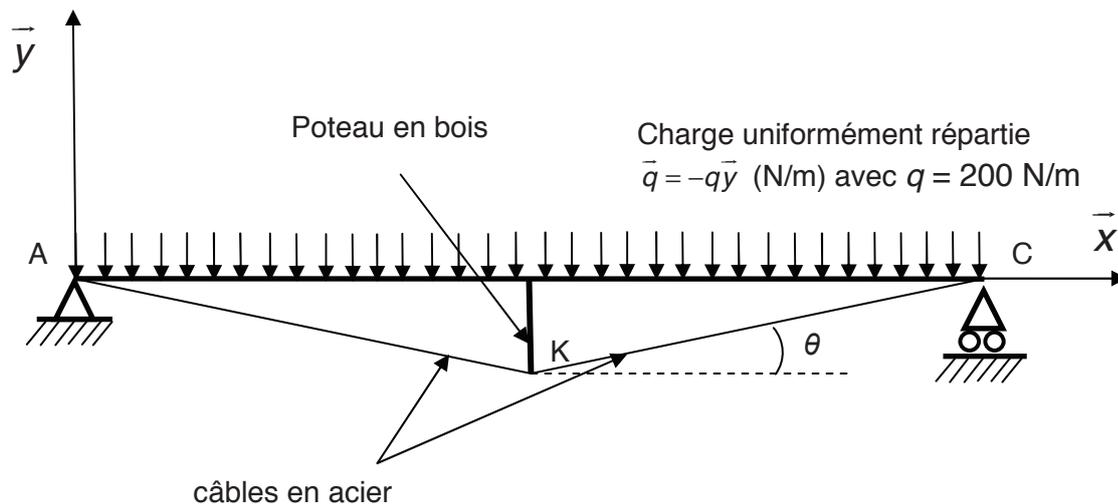


Figure 20 : solution avec des câbles en acier

On suppose, par symétrie, que les efforts exercés au nœud K dans les câbles en acier sont égaux. On les notera F .

Question 41

En utilisant les résultats de la question 40 écrire l'équilibre du nœud K. En déduire une relation entre F et θ .

Pour des raisons esthétiques, la hauteur du poteau en bois doit être minimisée.

Question 42

À partir du résultat de la question 41 conclure sur la faisabilité de cette solution.

VII. SYNTHÈSE

Question 43

L'Observatoire a été qualifié de « maison active naturellement », justifier cette appellation. Proposer d'autres solutions techniques qui auraient pu être utilisées dans le cadre d'une construction de Haute Qualité Environnementale.

DOSSIER TECHNIQUE

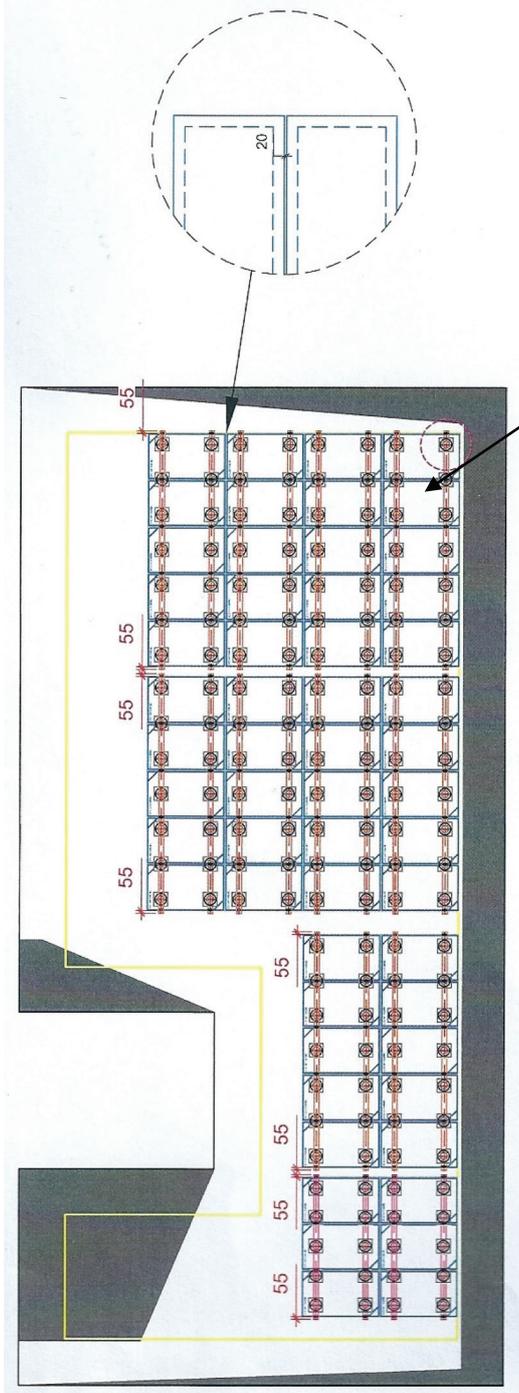
Document annexe A0

Plans de l'Observatoire à l'échelle 1/100^e



Document annexe A1

Disposition des panneaux photovoltaïques sur le toit de l'Observatoire



- LEGENDE :**
- [] Module Photovoltaïque
 - [] Plot PP
 - [] Supports de chemins de câbles (1 tout les 1.5m)
 - [] Point de départ pour plan d'exécution
 - [] Zone d'ombre
 - [] Zone hors avis technique



Panneau photovoltaïque - Solar fabrik – en silicium amorphe
de puissance maximale 245 Wc (Watt crête)
Dimensions d'un panneau : 1667 x 998 en mm
Pente du rampant : 3 %
Référence de production annuelle à Oberschaeffolsheim :
733 kWh/kWc (kilo Watt crête)

Document annexe A2

Extrait de la documentation technique des panneaux photovoltaïques

Caractéristiques électriques en STC (Standard Test Conditions: 1000 W/m², 25 °C, AM 1,5)

Puissance nominale	P_{max}	245 W	250 W	255 W	260 W	265 W
Limites de tri puissance		0/+5 W				
Tension	U_{MPP}	29,90 V	29,97 V	30,08 V	30,18 V	30,29 V
Tension circuit ouvert	U_{OC}	37,28 V	37,49 V	37,69 V	37,90 V	38,10 V
Courant	I_{MPP}	8,21 A	8,35 A	8,48 A	8,62 A	8,75 A
Courant de court-circuit	I_{SC}	8,78 A	8,86 A	8,94 A	9,02 A	9,10 A
Rendement	Premium L poly Premium inceil L poly	14,7 % 14,6 %	15,0 % 14,9 %	15,3 % 15,2 %	15,6 % 15,5 %	15,9 % 15,8 %

Caractéristiques électriques sous 800 W/m², NOCT (45°C +/- 2K), AM 1,5

Puissance en MPP	P_{max}	185 W	189 W	193 W	197 W	200 W
Tension	U_{MPP}	27,98 V	28,02 V	28,05 V	28,09 V	28,12 V
Tension circuit ouvert	U_{OC}	34,54 V	34,59 V	34,63 V	34,68 V	34,73 V
Courant	I_{MPP}	6,62 A	6,74 A	6,86 A	6,98 A	7,12 A
Courant de court-circuit	I_{SC}	7,02 A	7,10 A	7,18 A	7,26 A	7,34 A

Sous un ensoleillement de 200 W/m² et une température de 25 °C, le rendement diminue de 3 % environ par rapport au rendement en conditions standard STC.

Températures

Coefficient de température puissance	$T_k(P_{MPP})$	-0,43 %/K
Coefficient de température tension	$T_k(U_{OC})$	-0,32 %/K
Coefficient de température courant	$T_k(I_{SC})$	0,04 %/K

Autres caractéristiques

Nombre de cellules	60
Tension max. système	1000 V
Capacité maximale de retour de courant	17 A
Protection frontale	Verre trempé spécial pauvre en fer avec revêtement anti-reflet; effet d'éblouissement réduit au minimum
Raccordement du module	Boîte de jonction avec 3 diodes de dérivation IP67 sans potting, câble solaire de 2 x env. 1 m, Ø 4 mm ² , connecteur PV4 IP 68

Certifications

EN CEI 61215 (2^e éd.)¹

EN CEI 61730-1, -2¹

EN 13501-1, classe E

Classe de protection II

Directive 2006/95/EG (CE)

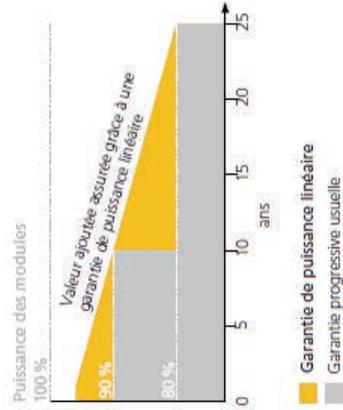
CSTB avis technique 21/14-44

MCS

TÜVdotCOM (cadre Solirif®)**

Résistance à la grêle RG3

¹Sous réserve de certifications ultérieures.



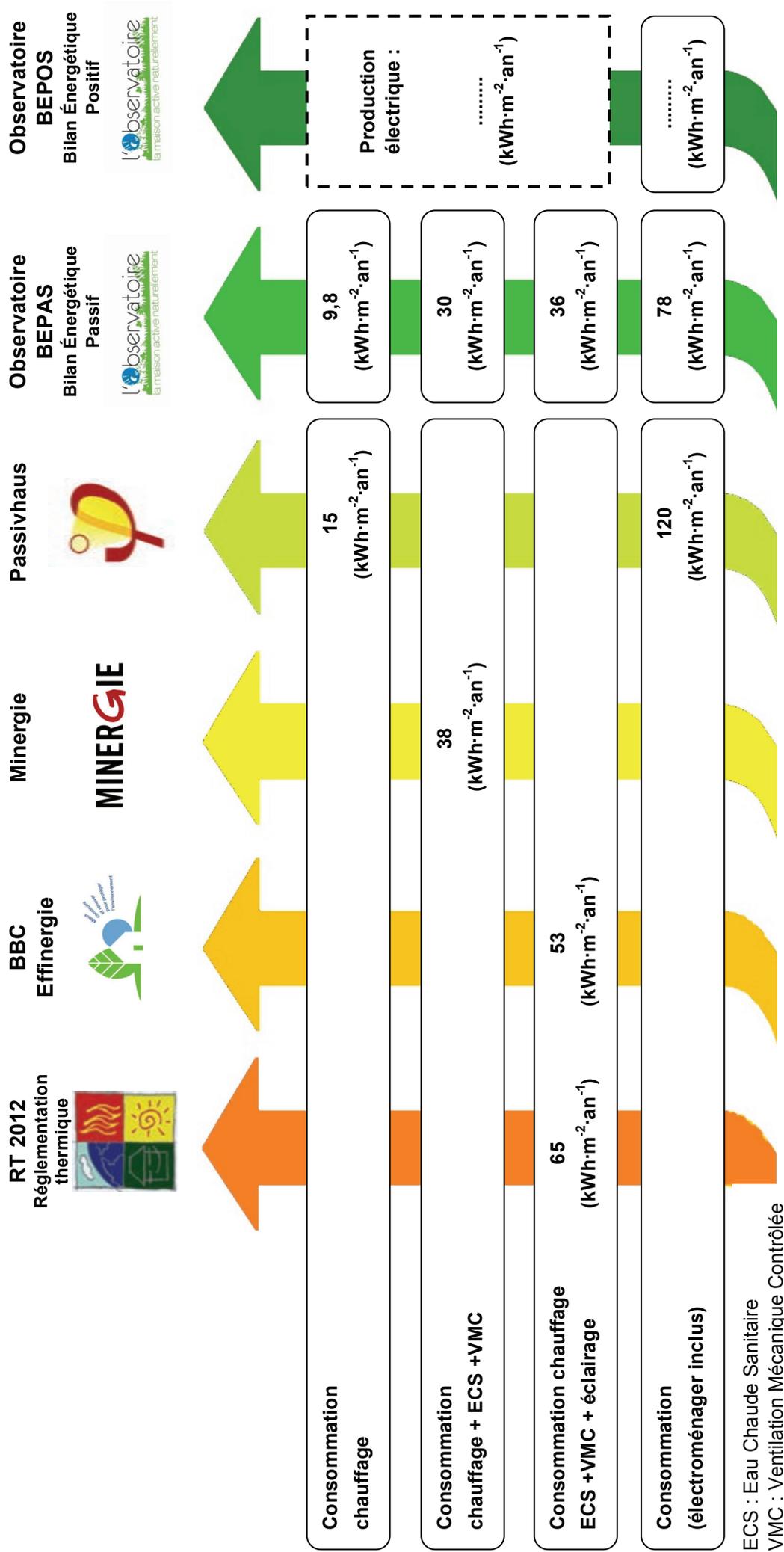
Document annexe A3

Extrait de la documentation des onduleurs

Caractéristiques techniques	Sunny Boy 3300	Sunny Boy 3800	Sunny Boy 3800/V
Entrée (DC)			
Puissance DC max. (quand $\cos \varphi=1$)	3820 W	4040 W	3900 W
Tension DC max.	500 V	500 V	500 V
Plage de tension photovoltaïque, MPPT	200 V - 400 V	200 V - 400 V	200 V - 400 V
Tension nominale DC	200 V	200 V	200 V
Tension DC min. / tension de démarrage	200 V / 250 V	200 V / 250 V	200 V / 250 V
Courant max. par MPPT / par entrée	20 A / 16 A	20 A / 16 A	20 A / 16 A
Nombre de MPP trackers / Nombre max. d'entrées (en parallèle)	1 / 3	1 / 3	1 / 3
Sortie (AC)			
Puissance nominale AC (pour 230 V, 50 Hz)	3300 W	3800 W	3680 W
Puissance apparente AC max.	3600 VA	3800 VA	3680 VA
Tension nominale AC ; plage	220, 230, 240 V ; 180 V - 265 V	220, 230, 240 V ; 180 V - 265 V	220, 230, 240 V ; 180 V - 265 V
Fréquence du réseau AC (autoréglable) ; plage	50, 60 Hz ; $\pm 4,5$ Hz	50, 60 Hz ; $\pm 4,5$ Hz	50, 60 Hz ; $\pm 4,5$ Hz
Courant de sortie max.	18 A	18 A	16 A
Facteur de puissance ($\cos \varphi$)	1	1	1
Phases d'injection / Phases de raccordement	1 / 1	1 / 1	1 / 1

DOCUMENT RÉPONSE DR1

Question 4



ECS : Eau Chaude Sanitaire
 VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

DOCUMENT RÉPONSE DR2

Questions 6, 7, 8 et 10

	Température interface (°C)	Pression de vapeur saturante (Pa)	Pression partielle (Pa)
Intérieur	19	2166	$P_{vint} =$
Interface intérieur / BA13			$P_{vint} =$
Interface BA13 / lame d'air			
Interface lame d'air / OSB			
Interface OSB / ouate de cellulose			
Interface ouate de cellulose / OSB			
Interface OSB / polystyrène			
Interface polystyrène / enduit			
Interface enduit / extérieur			$P_{vext} =$
Extérieur	- 5	439	$P_{vext} =$

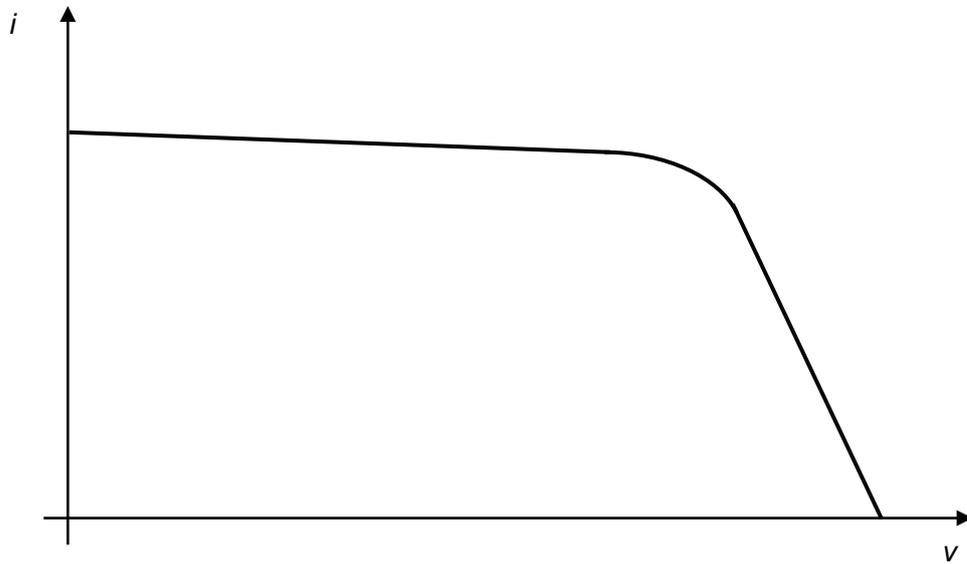
Hypothèses

P_{vint} à l'intérieur et à l'interface intérieur / BA13 sont égales.

P_{vext} à l'extérieur et à l'interface enduit / extérieur sont égales.

DOCUMENT RÉPONSE DR3

Questions 25 et 27



Questions 26 et 28

